Manual de fertilidad y evaluación de suelos

Edición 2012

Editores: Alberto Quiroga y Alfredo Bono



EEA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas"
Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria

Centro Regional La Pampa - San Luis del INTA y Áreas Estratégicas

"Proyecto Regional Mixto"
"Área Estratégica de Gestión Ambiental (AEGA)"
"Área Estratégica de Recursos Naturales (AERN)"

La información que se encuentra en este manual ha podido ser obtenidos gracias al trabajo de los ayudantes de campo y del laboratorio de Suelos de la EEA Anguil.

Ayudantes de Campo y Técnicos del Laboratorio de Suelos y Agua
Raúl Brañas
Eduardo Calabaza
Adalberto Colotti
Luis Cornejo
Antonio Domínguez
Roberto Gómez
Omar Gutiérrez
Raúl Olguín
Guillermo Pérez

Diseño Gráfico
Dis. Gráf. Francisco Etchart

Impresión
Gustavo J. Moyano
Luisa Blatner de Mayoral

Impreso en los talleres gráficos de la
EEA INTA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas"

Tirada de 1000 ejemplares
Noviembre de 2012



EDICIONES INTA
EEA INTA Anguil Ing. Agr. Guillermo Covas
(6326) Anguil, La Pampa, Argentina.

Este manual está dedicado a

nuestros compañeros Omar “Guti” Gutiérrez y Raúl Brañas por su valioso aporte en las tareas del laboratorio de suelos y agua durante casi 40 años. Con su trabajo han posibilitado la concreción de esta y muchas otras publicaciones, y es ampliamente reconocido su aporte en la formación de numerosos recursos humanos que desarrollan su actividad en la región. Hoy gozan de sus merecidas jubilaciones ¡¡que las disfruten!!

Grupo de Suelos

contenidos

autores

Silvia Beatriz Aimar, Licenciada en Geología, M.Sc.
Facultad de Agronomía y Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UNLPam)
Egresada de la UNLPam con un posgrado en la UNS
simar@exactas.unlpam.edu.ar

Carlos Antonini, Ingeniero Agrónomo
Profesor Adjunto Cátedra de Agricultura Especial
Facultad de ciencias Agrarias. UNCuyo

Fernando Arenas, Ingeniero Agrónomo
Profesor Adjunto Cátedra de Agricultura Especial
Facultad de ciencias Agrarias. UNCuyo

Fernando Avecilla, Ingeniero en Recursos Naturales y Medio Ambiente
INCITAP (CONICET)
Egresado de la UNLPam
ferave85@hotmail.com

Pamela Azcarate, Licenciada en Química. M.Sc.
Grupo de Protección Vegetal, Laboratorio de Malezas y Herbicidas. EEA Anguil INTA
Egresada de la UNLPam con un posgrado en la UBA
pazcarate@anguil.inta.gov.ar

Alfredo Bono, Ingeniero Agrónomo. M.Sc., Doctor
Grupo de Suelos, Fertilidad y fertilización de cultivos. EEA Anguil INTA
Egresado de la UBA con un posgrado en NMSU, USA y UBA
abono@anguil.inta.gov.ar

Daniel Eduardo Buschiazzo, Ingeniero Agrónomo. M.Sc., Doctor
INTA-Fac. de Agronomía (UNLPam)-INCITAP (CONICET)
Egresado de la UNS con posgrados en la UNS y la Universidad de Hohenheim, Alemania
buschiazzo@agro.unlpam.edu.ar

Jorge Caviglia, Ingeniero Agrónomo. M.Sc.
UE y DT Anguil. EEA INTA Anguil
Egresado en la UNS con un posgrado en el Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas (INRA) de Dijon, Francia
jcaviglia@anguil.inta.gov.ar

Laura Andrea de Oro, Ingeniera en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Doctora
INCITAP (CONICET)-Universidad Nacional de La Pampa
Egresada de la UNLPam con un posgrado en la UNS
lauradeoro@conicet.gov.ar

Romina Fernández, Ingeniera Agrónoma. M.Sc.
Grupo de Suelos, Manejo y Conservación de Suelos. EEA Anguil INTA
Egresado de la UNLPam con un posgrado en la UNS
rfernández@anguil.inta.gov.ar

Ileana Frasier, Ingeniera Agrónoma
Grupo de Suelos, EEA Anguil INTA, Becaria de CONICET
Egresada de la UBA
lfrasier@anguil.inta.gov.ar

Carolina Gaggioli, Ingeniera Agrónoma
Grupo de Suelos, EEA Anguil INTA, Becaria de CONICET
Egresada de la UNLPam
carolina_gaggioli@hotmail.com

Nanci Kloster, Licenciada en Química
Grupo de Suelos, Laboratorio de Suelos. EEA Anguil INTA
Egresada de la UNLPam.
nkloster@anguil.inta.gov.ar

Héctor Lorda, Ingeniero Agrónomo. M.Sc.
UE y DT Anguil. EEA INTA Anguil
Egresado de la UNLPam con un posgrado en la UNS
hlorda@anguil.inta.gov.ar

Mariano Javier Méndez, Ingeniero Agrónomo. Doctor
INCITAP (CONICET)-Universidad Nacional de La Pampa
Egresado de la UNLPam con un posgrado en la UNS
marianomendezz@hotmail.com

Elke Noellemeyer, Ingeniera Agrónoma
Cátedra de Edafología, Conservación,
Manejo y Fertilidad de Suelos. Facultad de Agronomía. UNLPam.
Egresada de University of Saskatchewan, Canada
noellemeyer@agro.unlpam.edu.ar

Juan Esteban Panebianco, Ingeniero en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Doctor
INCITAP (CONICET)-Universidad Nacional de La Pampa
Egresado de la UNLPam con un posgrado en la UNS
jpanebianco@hotmail.com

Guillermina Pérez Habiaga, Ingeniera Agrónoma
Grupo de Suelos, EEA Anguil INTA, Becaria de CONICET
Egresada de la UNLPam
guillerminaperezhabiaga@conicet.gov.ar

Alberto Quiroga, Ingeniero Agrónomo. M.Sc., Doctor
Grupo de Suelos, Manejo y Conservación de Suelos. EEA Anguil INTA
Egresado de la UNLPam con posgrados en la UNS
aquiroga@anguil.inta.gov.ar

Nicolás Romano, Ingeniero Agrónomo
Grupo de Suelos, Fertilidad y fertilización de cultivos. EEA Anguil INTA.
Egresado de la UNPam.
nromano@anguil.inta.gov.ar

Matías Saks, Ingeniero Agrónomo
Depto. de Desarrollo Bunge Argentina SA.
Egresado de la UNPam.
matias.saks@bunge.com

objetivo

El objetivo de este manual es realizar una síntesis de los aspectos más importantes y utilizar los conceptos básicos a tener en cuenta en fertilidad de suelos y fertilización de cultivos para poder interpretar y tomar decisiones sobre el manejo de los sistemas mixtos de la región. Los contenidos abordados en el mismo surgen como respuesta a consultas más frecuentes de productores y profesionales de la región. Además es un apoyo a los cursos de capacitación para profesionales dictados desde 2002 y que periódicamente se dictan en la EEA INTA Anguil. Para ello se incluyen en este trabajo datos acumulados durante 40 años de estudio en los suelos de la Región Semiárida y Subhúmeda Pampeana. Mucha de la información que se presenta en los distintos capítulos de este trabajo fueron presentados en publicaciones técnicas de la EEA INTA Anguil, en revistas de divulgación, en congresos de la especialidad, en revistas internacionales, en capítulos de libros y fueron parte de trabajos de tesis de grado y posgrado.

Alberto Quiroga y Nicolás Romano

El sistema suelo y características del intercambio de iones

El suelo es un sistema abierto, dinámico, constituido por tres fases. La fase sólida esta compuesta por los componentes orgánicos e inorgánicos, que a través de distintos arreglos dan lugar a la estructura del suelo. La forma (tipo), el tamaño (clase) y la resistencia (grado) constituyen parámetros para clasificar la estructura de los suelos. Estos arreglos también incluyen el espacio poroso dentro de los agregados y entre los agregados, que de acuerdo al diámetro de los mismos, cumplen la función de almacenar agua o de drenaje e intercambio gaseoso. Por ejemplo, Taboada y Micucci (2002) señalan que el crecimiento de las raíces de la mayoría de las plantas se limita con menos de 10% del espacio poroso lleno de aire y con una tasa de difusión de oxígeno menor a 35 $\mu g/m^2 seg$. Una adecuada proporción de poros menores de 10 µm son necesarios para almacenar agua, mientras que también una proporción de macroporos mayores de 100 µm (más 10%) son necesarios para la captación del agua, el desarrollo raíces y el intercambio gaseoso. La Figura 1 representa un esquema simplificado de las relaciones de fases y los principales componentes del suelo: materia orgánica (MO) y sus fracciones, fracciones texturales (arcilla, limo y arena), sistema poroso con características cualitativas y cuantitativas influenciadas por la textura, MO y estructura.

Las partículas del suelo tienen tamaños muy variables que abarcan desde 25 cm a menores de 1 µm. La textura define la relación porcentual de cada uno de los grupos de partículas menores de 2 mm de diámetro. Estas se denominan arena, limo y arcilla y constituyen las fracciones granulometricas, las cuales le otorgan al suelo alguna de las siguientes características:

- **Arena gruesa:** macroporosidad alta, permeabilidad alta, compacidad baja, poca inercia térmica, facilidad de laboreo, energía de retención de agua baja, almacenamiento de nutrientes bajo.
- **Limo:** fertilidad física deficiente, riesgo de encostramiento superficial, velocidad de infiltración baja, inestabilidad estructural alta, permeabilidad media a baja, erosionabilidad alta, almacenamiento de nutrientes y capacidad de retención de agua útil media a baja.
- **Arcilla:** fertilidad química alta según mineralogía, superficie específica muy alta, capacidad de intercambio catiónico alta y variable con mineralogía, capacidad de retención de agua útil alta, microporosidad alta, dificultad penetración raíces.

La textura es una de las propiedades más permanentes del suelo, no obstante puede sufrir cambios

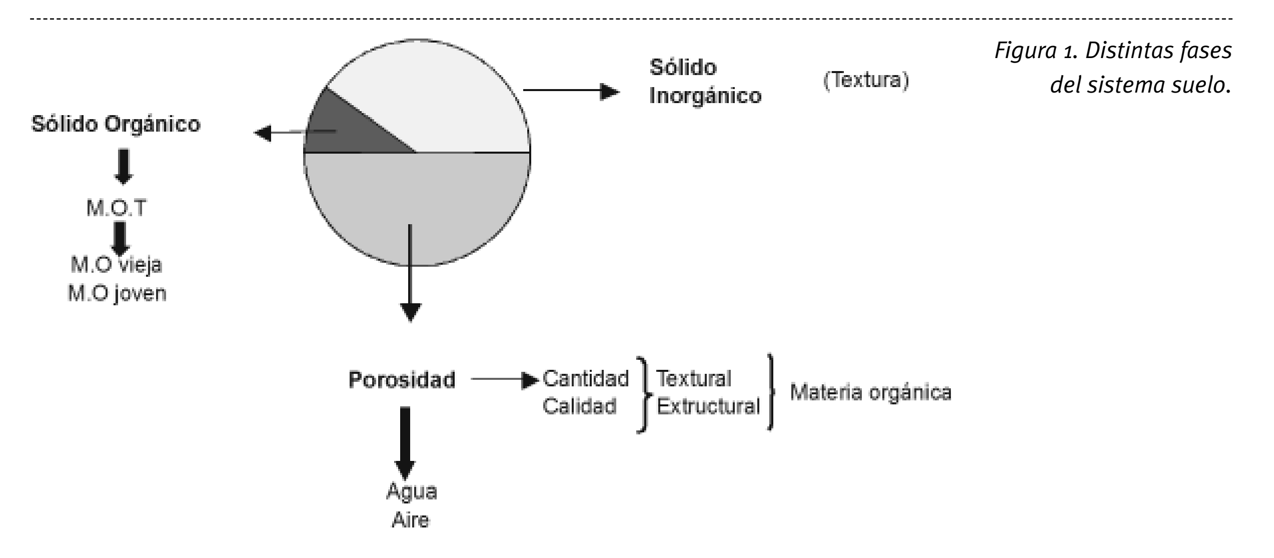


Figura 1. Distintas fases del sistema suelo.



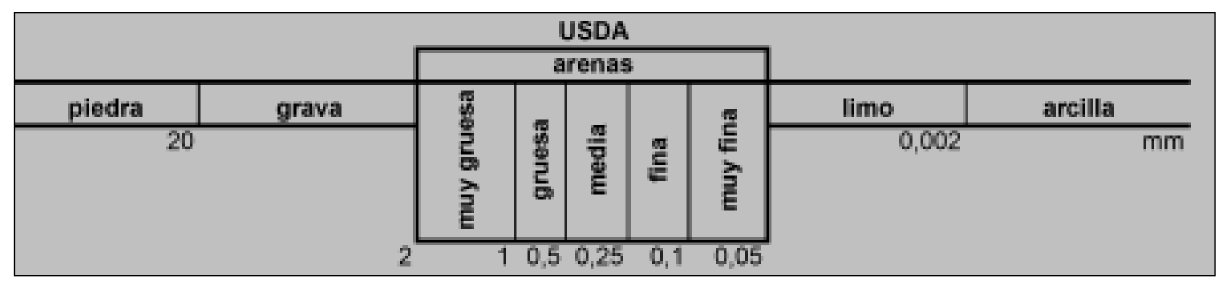


Figura 2. Tamaño de partículas para dos sistemas de clasificación. Adaptado de Dorronsoro (2007).

por laboreo (mezcla de horizontes), erosión eólica (suelos más gruesos por pérdida de material), erosión hídrica (deposición de materiales más finos), etc. Es el elemento que mejor caracteriza al suelo desde el punto de vista físico. La permeabilidad, la consistencia, la capacidad de intercambio de iones, de retención hídrica, distribución de poros, infiltración y estructura, son algunas de las características del suelo que en gran medida dependen de la proporción de las distintas fracciones texturales que constituyen un determinado suelo.

Fracciones granulométricas

Para separar las distintas fracciones granulométricas (arcilla, limo y arena) normalmente se recurre a técnicas de sedimentación (ley de Stoke) que permiten separar partículas menores de 70 um. Para cuantificar distintas fracciones de arenas se emplean tamices. En ambos casos, sedimentación y tamizado, se requiere un tratamiento previo de la muestra de suelo a fin de que las fracciones se encuentren en forma individual para ser cuantificadas convenientemente.

En la Figura 2 se indican los tamaños para las distintas fracciones, de acuerdo al criterio del Departamento de Agricultura de EE.UU. adoptado por la Argentina. También se presenta el sistema de la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (ISSS).

En función de propiedades que le confieren las fracciones más finas y de la acción de cementantes inorgánicos (sílice coloidal, carbonatos de calcio) u orgánicos (humus), es muy común que las partículas más pequeñas se agrupen muy establemente, formando microagregados del tamaño del limo o de las arenas, denominados pseudo-limo o pseudo arena. Estas formaciones también pueden observarse por presencia de concreciones de hierro y manganeso o de carbonato de calcio.

La proporción de las distintas fracciones determinan la textura de un suelo que puede ser representada a partir del triángulo textural. Las clases texturales dentro del sistema del USDA son 12 (Figura 3).

En la Región Semiárida Pampeana predominan los suelos de texturas franco arenoso, arenoso franco y franco. En el sector Este de La Pampa, Sur de Córdoba y Este de San Luís predominan suelos de granulometrías más gruesas, mientras que en la región de la Planicie con Tosca aumentan los contenidos de limos y de arcilla dando lugar a suelos que comparativamente poseen mayor capacidad de retención de agua, mayor capacidad de intercambio catiónico y menor macroporosidad. Este comportamiento se encuentra asociado con diferencias en la superficie específica de las fracciones texturales que constituyen esos suelos (Figura 4).

Para las distintas fracciones granulométricas, los valores aproximados de superficie específica son los indicados en la Tabla 1.

Coloides en el suelo

La Química Coloidal es una rama especializada dentro de la físico-química y en el caso de los suelos comprende las arcillas, los óxidos y las sustancias húmicas (Conti 2005). Durante los procesos que desencadenan la formación de los suelos, como por

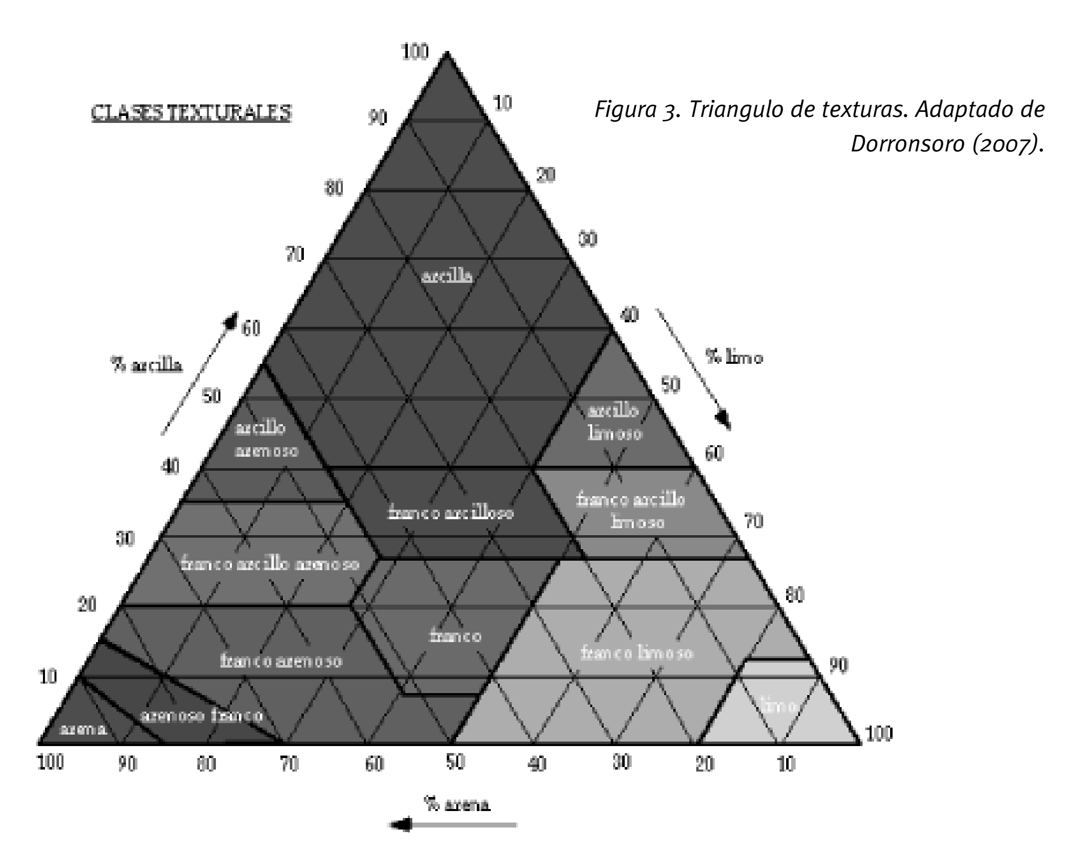


Figura 3. Triangulo de texturas. Adaptado de Dorronsoro (2007).

ejemplo la meteorización del material parental, ciertos minerales y materiales orgánicos se dividen en partículas extremadamente pequeñas. Distintos procesos químicos más tarde reducen aún más el tamaño de estas partículas hasta el punto que no es posible verlas a simple vista. Estas partículas son denominadas coloides.

Los coloides de las arcillas tienen estructura laminar y naturaleza cristalina. En la mayoría de los suelos los coloides de arcilla son más numerosos que los coloides orgánicos. Para clasificarlos pueden tenerse en cuenta aspectos como su relación con el agua y su carga (Conti 2005).

Figura 4. Relación entre la cantidad de superficie y el tamaño de las partículas. Adap. de Porta Casanellas 1999.

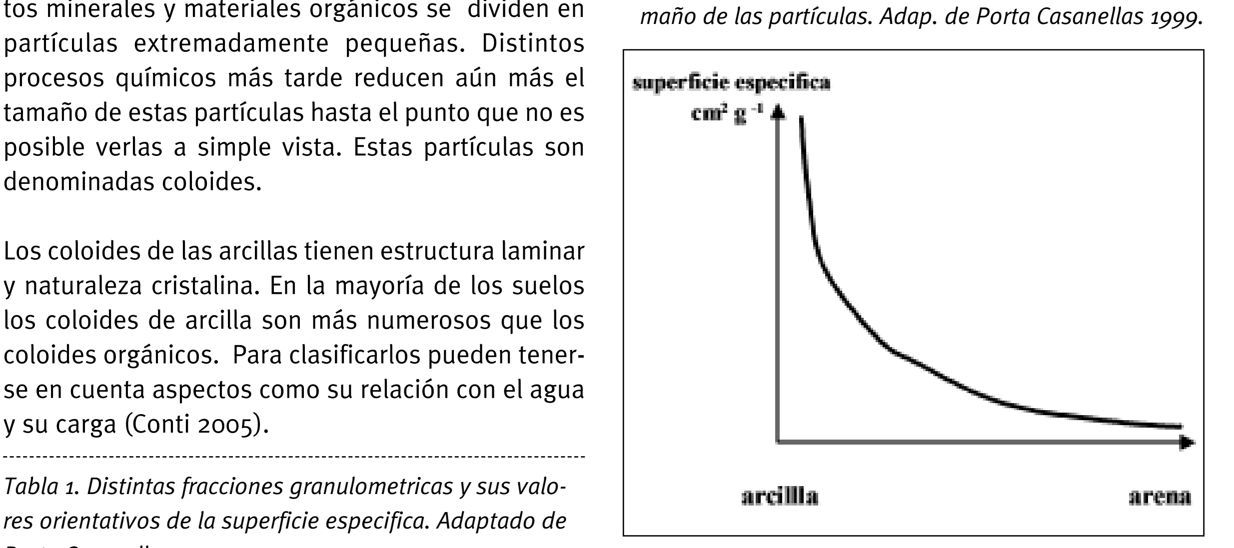
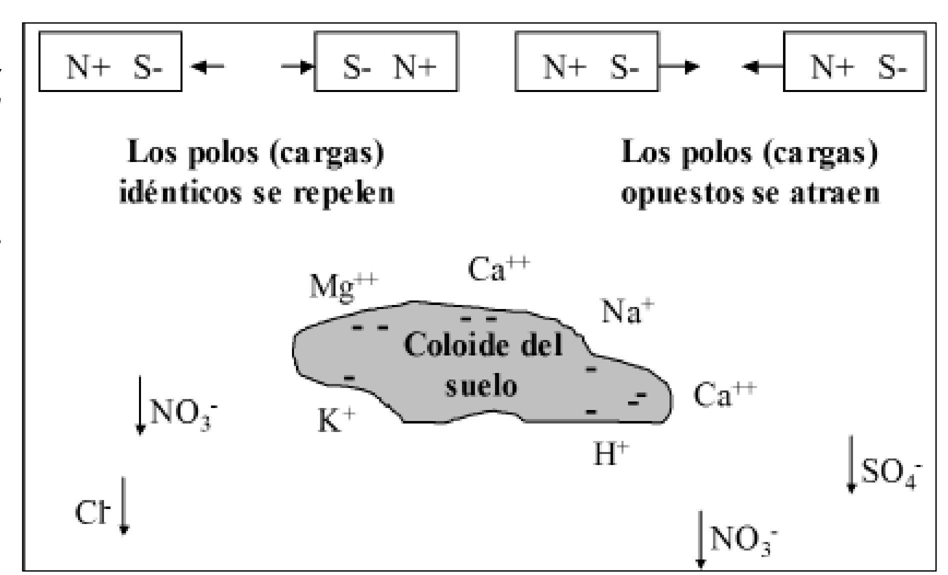


Tabla 1. Distintas fracciones granulometricas y sus valores orientativos de la superficie especifica. Adaptado de Porta Casanellas 1999.

Fracción	Diámetro aparente (mm)	Nº de partículas por gramo	Superficie especifica ($cm^2 g^{-1}$)
Arena muy gruesa	2.00-1.00	90	11
Arena gruesa	1.00-0.50	720	23
Arena media	0.50-0.25	5700	45
Arena fina	0.25-0.10	46.000	91
Arena muy fina	0.10-0.05	722.000	227
Limo	0.05-0.002	5.776.000	454
Arcilla	< 0.002	90.260.853.000	Variable según la mineralogía de la arcilla

Figura 5. Los cationes son atraídos por las arcillas y la materia orgánica del suelo, los aniones en cambio son repelidos. Adaptado de Darwich, 1998



• Por su relación con el agua los coloides pueden ser hidrofílicos que adsorben gran cantidad de agua e hidrófobos, los cuales presentan menos moléculas de agua unidas sobre las partículas y floculan fácilmente con el agregado de electrolitos. Los óxidos de hierro (Fe) y aluminio (Al) se consideran hidrófobos, mientras que las arcillas silicatadas (principalmente expandentes) y la MO se consideran hidrofílicas.

• Por su carga, se llaman coloides positivos (óxidos de Fe y Al) a los que presentan como balance cargas positivas a pH normales del suelo. Se llaman negativos aquellos que como balance tienen carga neta negativa (la mayoría de las arcillas silicatadas, sustancias húmicas).

Cada coloide tiene una carga eléctrica negativa desarrollada durante el proceso de formación, que le confiere la propiedad de atraer partículas con cargas positivas y repeler partículas con cargas negativas al igual que los polos de un imán (Figura 5).

Esta característica permite explicar por qué los nitratos (NO_3^-) o los cloruros (Cl^-) se lixivian más fácilmente del suelo que el ión amonio (NH_4^+) o el ión potasio (K^+).

Intercambio Catiónico

Se define el intercambio catiónico como los procesos reversibles por los cuales las partículas sólidas del suelo adsorben iones de la fase acuosa liberando al mismo tiempo otros iones en cantidades equivalentes, estableciéndose el equilibrio entre ambas fases. La capacidad de intercambio catiónico normalmente se expresa en meq/100 gr de suelo y de acuerdo a la proporción de coloides y mineralogía de los mismos (superficie específica) puede variar en un amplio rango. En suelos arenoso franco de la RSP alcanzan valores tan bajos como 5 meq/100gr, mientras que en suelos francos pueden superar los 15 meq/100gr.

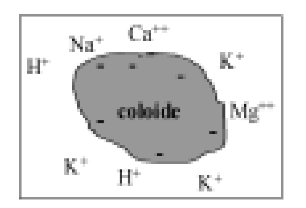
Es un proceso dinámico que se desarrolla en la superficie de las partículas. Como los iones adsorbidos quedan en posición asimilable constituyen la reserva de nutrientes para las plantas. La siguiente reacción muestra como el calcio puede ser intercambiado por dos iones hidrógeno H^+ o por dos iones K^+.

$$Ca^{++} \text{ coloide} + 2H^+ \rightleftharpoons H^+ H^+ \text{ coloide} + Ca^{++}$$

Esta reacción ocurre rápidamente, es químicamente equivalente y además es reversible ya que si se le agrega más calcio al sistema este desplazará nuevamente al hidrógeno. Este proceso ocurre en suelos con bajo pH cuando se realiza la práctica del encalado. Más adelante analizaremos algunos casos de sistemas de producción tamberos, con alta extracción de bases (silos maíz, pasturas) donde la saturación del complejo de intercambio con bases puede resultar limitante para la nutrición de los cultivos.

$$\text{coloide } H^+ H^+ + Ca^{++} \rightleftharpoons \text{coloide } Ca^{++} + 2H^+$$

Las causas que originan el intercambio iónico son los desequilibrios eléctricos de las partículas del suelo. Para neutralizar las cargas se adsorben iones que quedan débilmente retenidos sobre las partículas del suelo y se pueden intercambiar con la solución del suelo.



Cationes en solución



Cationes adsorbidos al coloide

Al analizar este proceso Conti (2005) señala que el equilibrio entre cationes retenidos y los iones en la solución del suelo depende de la concentración de la solución y la actividad relativa de cada ión, de las características de cada catión (valencia y grado de hidratación) y del grado de afinidad entre el intercambiador y el catión. En la Tabla 2 se muestran ejemplos de distintos suelos.

Tabla 2. Proporción relativa de cationes metálicos adsorbidos en el complejo de intercambio de diferentes suelos pampéanos (capa arable).

CATIONES DE INTERCAMBIO %					
Suelo	pH	Ca	Mg	Na	K
Argiudol	5.8	80.8	13.0	---	6.2
Natralbol	6.5	65.2	21.1	1.8	11.9
Hapludol	6.3	51.0	32.7	5.0	11.3
Natracuol	9.8	50.0	13.7	36.4	9.9

En la Tabla 3 se muestra un resumen de evaluaciones realizadas en unos 30 establecimientos, donde se determinó capacidad de intercambio catiónico (CIC), cationes adsorbidos y se calcularon los porcentajes de saturación y relaciones entre cationes (Quiroga et al. 2007). Estos parámetros son importantes indicadores de las condiciones edáficas que pueden limitar la productividad de pasturas con base alfalfa. Al respecto, existen referencias que indican que la saturación con bases debe ser superior al 80%, la de Calcio debe ser superior al 40%, Magnesio superior al 10% y Sodio menor al 5%,

Profundidad : 0 - 10 cm						
0-10	L 2803	L 2805	L 1211	L 1213	L 1236	L 0210
CIC	17,67	18,33	16,60	18,93	16,63	10,4
Ca	4,60	5,67	3,40	8,77	3,37	5,69
Mg	1,83	2,73	1,60	4,07	1,60	2,51
Na	0,70	0,83	0,47	1,60	0,50	0,19
K	1,73	2	2,00	2,40	1,70	1,55
Valor S	8,86	11,23	7,47	16,84	7,17	9,95
% Sat	50,57	61,26	44,99	88,86	43,03	95,64
% Ca	26,18	30,87	20,50	46,29	20,26	54,76
% Mg	10,6	14,94	9,65	21,43	9,50	24,12
Ca/Mg	2,7	2,12	2,19	2,27	1,84	2,27
Profundidad : 10 - 20 cm						
10 - 20	L 2803	L 2805	L 1211	L 1213	L 1236	L 0210
CIC	17,93	17,6	16,27	18,80	16,40	9,9
Ca	4,57	5,83	3,47	7,87	3,27	5,54
Mg	3,30	2,57	1,73	4,17	1,80	2,67
Na	0,83	0,83	0,50	1,63	0,40	0,24
K	1,77	1,93	1,90	2,10	1,80	1,18
Valor S	10,47	11,16	7,60	15,77	7,27	9,63
% Sat	58,67	63,46	46,68	83,75	44,35	97,29
% Ca	25,62	33,16	21,28	41,75	19,92	55,98
% Mg	18,50	14,57	10,67	22,12	10,95	26,97
Ca/Mg	1,40	2,28	2,25	1,91	1,84	2,08

Tabla 3. Capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables (meq/100gr) para dos espesores (0-10 y 10-20 cm) en lotes de productores destinados a la producción tambera. L 2803 indica tambo 28 y lote 3.

Además es conveniente que la relación entre cationes no supere ciertos límites (ej. Ca/Mg menor de 5).

Cómo se puede observar en las Tablas anteriores los cationes qué predominan en los suelos son Ca^{+2}, Mg^{+2}, K^{+} Na^{+}. La predominancia de estos cationes se debe a que en los comienzos de la formación de las arcillas, la solución formada por la disolución de los silicatos contiene estos iones, además de aluminio (Al) e hierro (Fe), los cuales fueron liberados por la meteorización de los minerales primarios.

En las regiones más áridas y/ o semiáridas o subhúmedas , el Ca^{+2}, Mg^{+2}, K^{+}, Na^{+}, pasan a dominar el complejo de intercambio a pH cerca de la neutralidad o ligeramente alcalino. En regiones húmedas o subhúmedas con drenajes impedidos, el Na a pesar de su fácil desplazamiento, este no se lixivia y tiende a acumularse en el perfil pasando a ocupar más del 15% del complejo de intercambio, dando lugar a suelos sódicos (ej. Natracuol, Tabla 2).

El origen de las cargas puede ser permanente por sustitución isomórfica, donde un catión del interior del mineral que forma la arcilla es reemplazado por otro catión de menor o mayor valor valencia pero igual radio (Figura 6). Otra fuente de cargas es la variable o pH dependiente en la MO y arcillas tipo 1:1, dado por la ionización y protonación de grupos químicos específicos localizado en la superficie de los coloides (Figura 7).

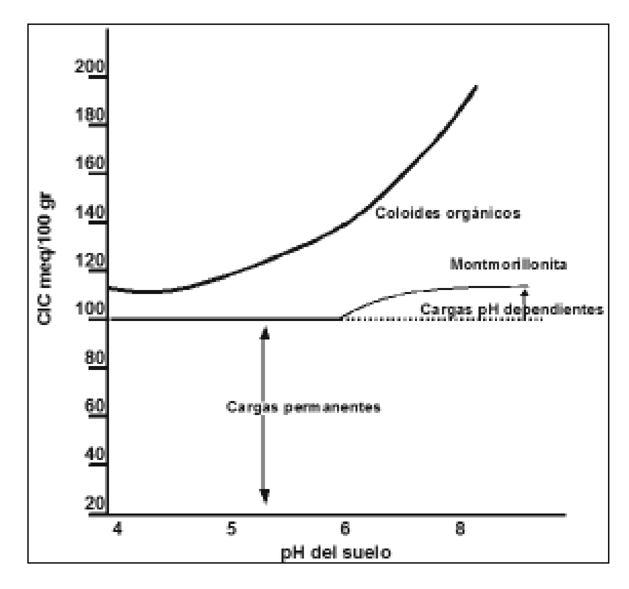


Figura 8. Carga dependientes de pH

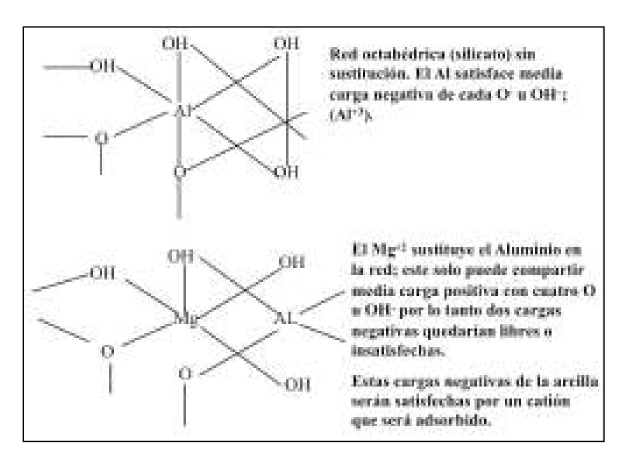


Figura 6. Sustitución isomorfica en la red cristalina de la arcilla. Adaptado de Darwich 1998.

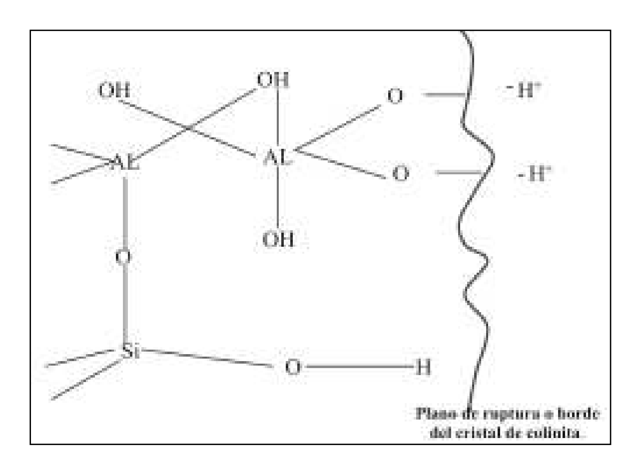


Figura 7. Carga negativa en el borde de las arcillas. En este caso los oxígenos serían las cargas negativas (insatisfechas). A pH superiores a 7 los hidrógenos están débilmente retenidos y pueden ser fácilmente intercambiados por otros cationes. Adaptado de Darwich, 1998.

La CIC en la mayoría de los suelos se incrementa al aumentar pH. Esto es debido al incremento de las denominadas cargas "pH dependientes" (Figura 8). En suelos ácidos pH 4 a 5 la mayoría de las cargas son permanentes dadas por la sustitución isomórfica en la red cristalina, pero en la medida que el pH aumenta sobre 6 la ionización de los ions H^{+} sea en la fracción orgánica o en los bordes expuestos de los cristales de arcilla aumenta considerablemente.

Cuando el % de saturación de bases es 80, significa que el 80% de la CIC está ocupada por bases y solo un 20% está ocupado por otros iones como hidrógeno y Al. Como se observa en la Figura 9, existe una estrecha relación entre el pH y el % de saturación de bases de un suelo.

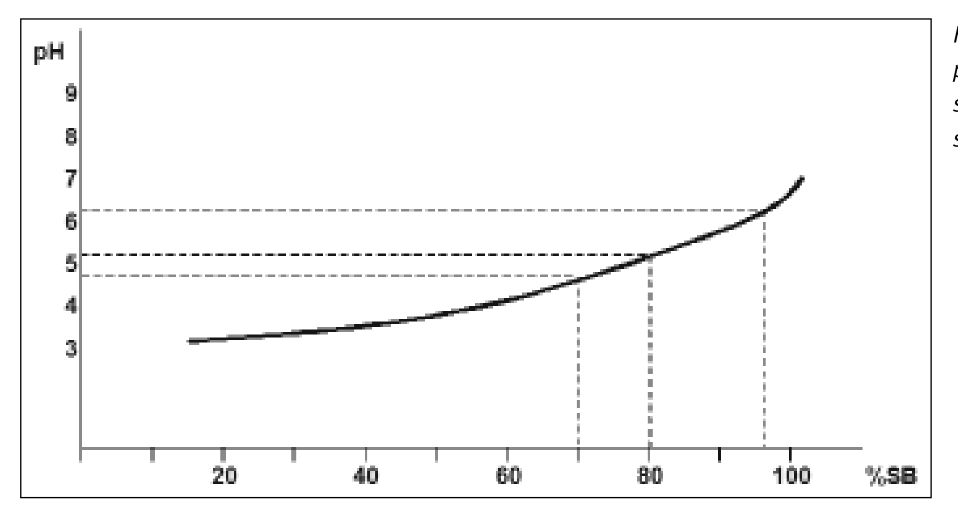
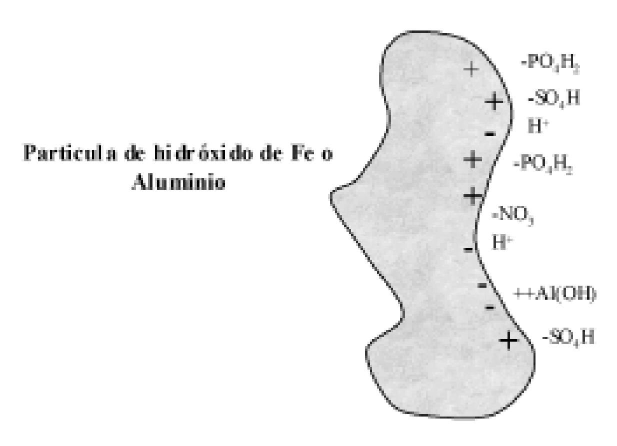


Figura 9. Relación entre el pH y el porcentaje de saturación de bases de un suelo.

Intercambio Aniónico

Existen algunos óxidos de Fe, hidróxidos de Al y otros materiales amorfos como el alofano qué desarrollan cargas positivas que atraen iones como fosfatos, sulfatos, nitratos y cloruros.



Estos procesos no tienen la magnitud de los procesos de intercambio catiónico en la mayoría de los suelos, pero son muy importantes como mecanismos para retener e intercambiar aniones. Alcanza valores importantes en suelos tropicales con altos contenidos de caolinita y arcillas de óxidos o en suelos ácidos de alofanos. La afinidad y fuerza de unión depende, como en los cationes, del orden de valencia e hidratación. Conti (2005) señala que en los fosfatos la adsorción puede resultar irreversible por la formación de uniones fuertes con el intercambiador (fijación de fosfatos) y la formación de sales de Al y Fe. Por eso para fosfatos el proceso se llama adsorción y no intercambio.

Cuando en el complejo se produce un intercambio, los iones del intercambiador son reemplazados por iones de la solución del suelo e inmediatamente se genera un nuevo equilibrio, el cual se modifica cuando las plantas toman nutrientes, hay lixiviación por agua, hay aportes por fertilizantes y/o enmiendas.
Resultan frecuentes las consultas respecto a la aplicación de enmiendas en suelos afectados por Na (sulfato de calcio) y en suelos con baja saturación de bases (pH bajo) que condicionan procesos biológicos considerados relevantes en los sistemas de producción de la RSP (ej. Fijación biológica de N). A manera de ejemplo y con la finalidad de reconocer distintos factores que deberán ser considerados, se presenta un análisis simplificado del cálculo de requerimiento de enmienda para el lote L2805 de la Tabla 3.

Valores de los cationes de intercambio en el espesor del suelo, 0-10 cm, considerando una densidad aparente de 1250 kg m^{-3}.

Capacidad de intercambio cationico:18,3 meq/100gr
Ca^{2+}: 5,67 meq/100gr^{-1}
Mg^{2+}: 2,73 meq/100gr^{-1}
K^+: 2.00 meq/100gr^{-1}
Na^+: 0.83 meq/100gr^{-1}
Porcentaje de saturación de bases: 61,3%
El suelo en 10 cm de profundidad pesa 1.250.000 kg ha^{-1}.

Los valores de meq/100g de suelo a ppm o mg/kg de suelo.
• Calcio: 5,67 meq 100gr^{-1} x 20 (peso atómico del Ca dividido 2) x 10 = 1134 mgCa kg^{-1} x 1.250.000 kg ha^{-1} = 1417 kgCa ha^{-1}

• Magnesio: 2,73 meq 100gr^{-1} x 12 (peso atómico del Mg dividido 2) x 10 = 328 mgMg kg^{-1} x 1.250.000 kg ha^{-1} = 409 kgMg ha^{-1}

• Potasio: 2.00 meq 100gr^{-1} x 39 (peso atómico del K, valencia 1) x 10 = 780 mgK kg^{-1} x 1.250.000 kg ha^{-1} = 975 kgK ha^{-1}

• Sodio: 0.83 meq 100gr^{-1} x 23 (peso atómico del Na, valencia 1) x 10 =190,9 mgNa kg^{-1} x 1.250.000 kg ha^{-1} = 238 kgNa ha^{-1}

• Aporte de enmienda: si las pasturas de alfalfa requieren 80% de saturación con bases y el suelo en cuestión presenta 61,3%, es necesario lograr un incremento de aproximadamente 20%. Como la CIC es de 18,3 meq/100gr, el 20% representa 3,7 meq/100gr. Esta es la cantidad de protones que deben ser reemplazados por cationes (normalmente Ca y Mg). Considerando que 1 meq/100gr de Ca en el suelo en cuestión (10 cm espesor y 1250 kg/m3) representan 250 kg/ha de Ca, para incorporar el equivalente a 3,7 meq/100gr es necesario aportar 925 kg/ha de Ca. Posteriormente es necesario afectar este valor por la concentración de Ca en la enmienda utilizada y por la eficiencia de aplicación.

Bibliografía

• Conti M. 2005. Principios de Edafología, con énfasis en Suelos argentinos. Editorial Facultad de Agronomía (UBA), 430pp.

• Darwich N. 1998. Manual de la fertilidad de suelos y uso de fertilizantes. Mar del Plata, 182 pp.

• Dorronsoro C. 2007. Curso de Introducción a la Edafología. Universidad de Granada. España. TEMA 1: Edafología: concepto y fines. Formación del suelo. Procesos y factores formadores. El perfil del suelo. http://edafologia.ugr.es/introeda/temaoo/progr.htm.

• Echeverría E. y F. García. 2005. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. INTA-INPOFOS.

• Porta J., López Acevedo M. y C. Roquero.1999. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. 849 pp.

• Quiroga A., Fernández R., Farrell M. y O. Ormeño. 2007. Caracterización de los suelos de tambos de la cuenca de Trenque Lauquen. In: Revista CREA, Nº 324. pp. 84-86.

• Taboada M. y F. Micucci. 2002. Fertilidad Física de los Suelos. Ed. Facultad de Agronomía (UBA), 79pp.

Pamela Azcarate, Nanci Kloster y Guillermina Pérez Habiaga

Reacción del suelo: pH

La reacción del suelo hace referencia al grado de acidez o basicidad del mismo y generalmente se expresa por medio de un valor de pH (Porta Casanelas et al. 1999). El pH fue definido por Sorensen (1909) como el logaritmo negativo, en base 10, de la actividad del protón (H^+):

$pH = - \log a_{H^+}$ $\qquad a_{H^+}$ = actividad del H^+

En las soluciones diluidas, la actividad puede reemplazarse por la concentración sin alterar el resultado por lo tanto podemos expresarlo como:

$pH = - \log C_{H^+}$ $\qquad C_{H^+}$ = concentración de H^+

El significado práctico de la escala logarítmica es que permite visualizar que un cambio de una unidad de pH implica un cambio de 10 veces en el grado de acidez o alcalinidad del suelo. La medida se extiende en una escala de 1 a 14, un pH inferior a 7 es ácido y superior a 7 es alcalino. En sistemas naturales los valores de pH se hallan generalmente en un intervalo de 4,5 a 10.

El pH es una de las mediciones químicas más importante que se puede hacer en un suelo. A pesar de su simplicidad, no sólo indica si el mismo es ácido, neutro o alcalino, sino que aporta información básica para conocer su potencial agrícola, estimar la disponibilidad de nutrientes esenciales y la toxicidad de otros elementos. Permite predecir los cationes dominantes en los coloides del suelo y está involucrado en la retención de plaguicidas, factor importante al momento de evaluar contaminación de suelos y aguas y/o persistencia.

Fuentes de acidez y alcalinidad

Los factores que influyen en el valor del pH son diversos, entre los que podemos numerar:
• El material parental es la roca que dio origen a dicho suelo, si la misma es de de reacción ácida o alcalina aportará al pH de ése suelo.
• Las precipitaciones tienden a acidificar el suelo, por lixiviación de las bases calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), potasio (K^+) y sodio (N^{a+}), disueltas en solución e intercambio de las bases adsorbidas al complejo de intercambio por H^+ (Vázquez 2006).
• La mineralización de los residuos orgánicos genera amonio (NH_4^+) cuya posterior oxidación a nitrato (NO_3^-) ocurre con liberación de H^+. Además los ácidos húmicos, componentes de la materia orgánica

Fertilizantes	Reacción con el suelo
Urea	libera amoníaco y dióxido de carbono e inicialmente se observa un incremento en el pH del suelo por hidrólisis del amoníaco. Sin embargo esta variación del pH es temporario, y el suelo vuelve a su valor inicial luego de que el amonio producido es oxidado a NO_3^-, y se disocia el ácido carbónico (Montoya 1999; Tisdale et al. 1985)
Superfosfato triple (SPT)	es un fertilizante de reacción ácida, debido a la presencia del anión $H_2PO_4^-$.
Fosfato diamónico	es un fertilizante constituido por dos iones de carácter débil, por lo que la reacción final en el suelo resulta del equilibrio de disociación e hidrólisis entre ambos compuestos.
Azufre elemental	es un elemento que puede oxidarse en presencia de bacterias específicas. Durante dicha reacción de oxidación se liberan H^+ que disminuyen el pH del suelo.

Tabla 1. Reacción en el suelo de algunos fertilizantes empleados usualmente.

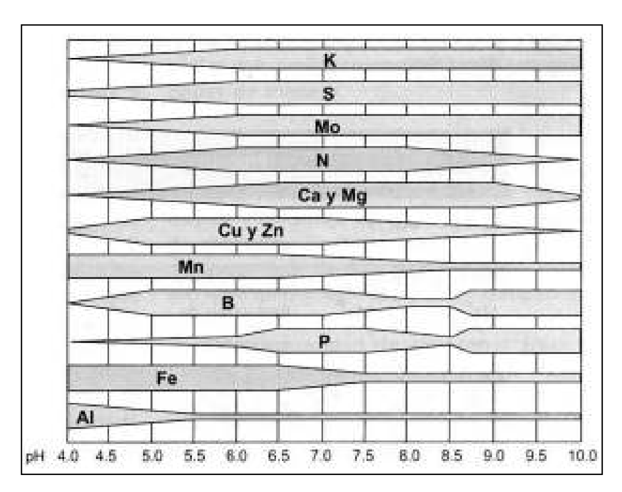


Figura 1. Disponibilidad de nutrientes en función del pH. Adaptado de Picone (2005).

más estable en el suelo, poseen grupos reactivos, carboxílicos y fenólicos, que se comportan como ácidos débiles.

• La extracción de bases por los cultivos, generalmente es mayor que el aporte de fertilización, lo que lleva a una acidificación del suelo (Casas 2003).

• El uso de fertilizantes, los cuales pueden dejar residuos ácidos o alcalinos de acuerdo al carácter ácido o básico débil de los iones constituyentes del mismo, o a su posibilidad de experimentar reacciones de óxido reducción. Mientras que también existen fertilizantes que no influyen en el pH del suelo (Tisdale et al. 1985) (Tabla 1).

Efectos del pH

El pH influye en las propiedades físicas y químicas del suelo. Las propiedades físicas resultan más estables a pH neutro. A pH muy ácido hay una intensa alteración de minerales y la estructura se vuelve inestable. A pH alcalino, las arcillas se dispersan, se destruye la estructura y existen malas condiciones desde el punto de vista físico (Porta Casanellas et al. 1999). La asimilación de nutrientes del suelo es afectada por el pH, ya que determinados nutrientes no se encuentran disponibles para las plantas en determinadas condiciones de pH (Figura 1). La mayor disponibilidad de nutrientes se da a pH entre 6-7,5 pero esto depende de cada cultivo. Cada planta adquiere mayor vigor y productividad dentro de ciertos intervalos pH. Esto no implica que el cultivo no pueda vivir fuera del intervalo indicado dado que el mismo presenta cierta capacidad de adaptación (Tabla 2).

Tabla 2. Intervalos de pH óptimo y de rendimiento satisfactorio para diversos cultivos.

Especies	Óptimo	Tolerancia para rendimiento satisfactorio
Alfalfa	6,5 – 7,5	6,0 – 8,0
Avena	5,5 – 7,0	4,0 – 7,5
Girasol	?	6,0 – 7,5
Maíz	5,5 – 7,0	5,0 – 8,0
Soja	6,0 – 7,0	4,5 – 7,5
Sorgo	5,5 – 7,0	5,5 – 8,5
Trigo	6,0 – 7,0	5,8 – 8,5

Clasificación de la acidez del suelo

Existen distintos tipos de acidez y su evaluación dependerá del objetivo deseado (Bohn et al. 1993; Porta Casanelas et al. 1999; Vázquez 2005). En los suelos los H^+ están en la solución del suelo y en el complejo de intercambio, constituido por la fracción mineral arcilla, los grupos débilmente ácidos de la materia orgánica y los polímeros hidratados de aluminio sin neutralizar. Los iones que están en solución representan la acidez activa o actual, y la acidez de cambio o de reserva esta dada por los que se encuentran adsorbidos en el complejo de intercambio. Ambas concentraciones de iones están en equilibrio dinámico, es decir, al eliminarse H^+ de la solución del suelo se liberan H^+ adsorbidos hasta alcanzar el equilibrio nuevamente, mostrando el suelo una fuerte resistencia a cualquier modificación de su pH. Esta resistencia de un suelo a variar su pH se la denomina capacidad buffer o tampón.

Otro tipo de acidez denominada acidez titulable o acidez total, se determina como la cantidad de base fuerte ($NaOH$ o $Ca(OH)_2$) requerida para elevar el pH de un suelo de un valor inicial a un valor final especificado. Esta tiene en cuenta la acidez activa y la de reserva y se utiliza para la caracterización de los suelos ácidos y para la determinación de la necesidad de encalado de los mismos.

Medición del pH

En laboratorio pueden evaluarse distintos tipos de acidez de acuerdo al objetivo deseado: pH actual, pH potencial y pH hidrolítico (Vázquez 2005).

• **pH actual:** es aquel que considera los H+ presentes en la solución del suelo y se considera un reflejo

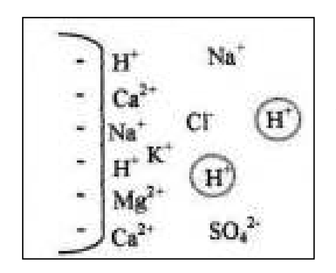


Figura 2. Esquema del equilibrio suelo-solución, señalando el H+ evaluado en la medida de pH actual.

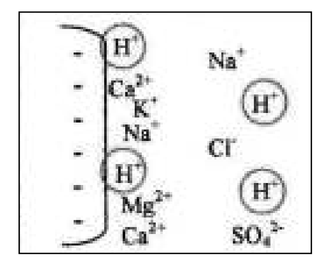


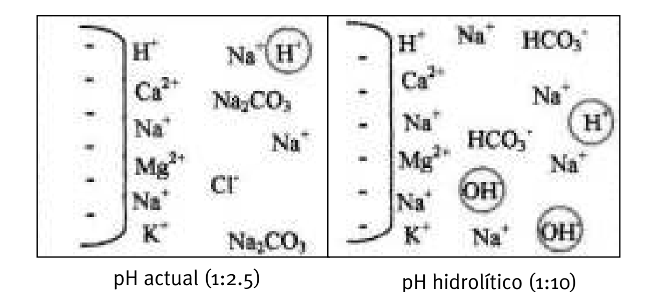
Figura 3. Esquema del equilibrio suelo-solución, señalando el H+ evaluado en la medida de pH potencial.

de lo que encontraría una planta en su ambiente radicular (Figura 2). Para su determinación se emplea como solución extractora agua destilada o cloruro de calcio (CaCl2) 0,01M en diferentes relaciones suelo:solución, tales como pasta de saturación, 1:1, 1:2 y 1:2,5. En nuestro país, se propuso realizar la determinación con una relación suelo:solución extractora 1:2,5 (IRAM 29410. 1999; SAMLA 2004; Vázquez 2005) y las diferencias técnicas se encuentran en los tiempos de agitado, reposo y lectura además de la solución extractante. El SAMLA (2004) propone 30 segundos de agitado, reposo de 1 hora y como solución extractora agua destilada, CaCl2 0.01M o KCl 1M, mientras que Vázquez (2005) e IRAM 29410 (1999) proponen un agitado de 5 minutos y reposo de 2 a 24 horas.

En Argentina, los trabajos de investigación muestran que existe una gran variación en la metodología utilizada para la determinación del pH. La mayoría emplean la medida de pH con una relación suelo:agua 1:2,5 (Echeverría et al. 2001; Galantini et al. 2005; Quiroga et al. 2006) aunque se encuentran algunos trabajos en que la determinación se realiza en pasta de saturación (Romano y Roberto 2007; Adema et al. 2003), y en menor medida con una relación suelo:agua 1:1 (De la Casa et al. 2003). En algunos casos no se menciona la técnica empleada. La Red INTA de Laboratorios de Suelo, Agua y Material Vegetal (RILSAV) propone realizar la determinación en relación suelo:solución 1:2,5, empleando agua destilada como solución extractora y realizando la medida luego de 2 horas de reposo de la suspensión. Kloster et al. (2007) buscaron un factor que permita convertir datos entre dos metodologías (pH en una pasta de saturación y una relación suelo:agua 1:2,5) y encontraron que no es posible definir un factor de conversión entre las técnicas, debido a que son numerosos los factores que influyen la determinación de pH (contenido de dióxido de carbono, CO2, el contenido de sales, CaCO3, si la solución se encuentra en reposo o agitación e inclusive donde se encuentra ubicado el electrodo). Es importante conocer la metodología además de tener en cuenta que, cada vez que se comparen resultados de análisis de laboratorio los mismos deben haber sido realizados con la misma metodología.

• **pH potencial:** cuantifica no solo los H^+ en solución, sino también los intercambiables, permitiendo realizar una estimación de la capacidad de acidificación del suelo (Figura 3). En dicho caso la solución extractora es cloruro de potasio (KCl) 1M.

• **pH hidrolítico:** se determina en aquellos casos en que el pH actual es alcalino, y permite estimar si un suelo esta afectado por sodificación debido a carbonato de sodio (diferencia entre pH hidrolítico y pH actual de una unidad o mayor). Para realizar esta determinación también se utilizan como soluciones extractoras agua destilada o CaCl2 0,01 M, pero se incrementa la relación suelo:solución a 1:10 (Vázquez 2005) (Figura 4). Es necesario tener en cuenta que los suelos sódicos no necesariamente son alcalinos, sino que el pH característico de dicho suelo dependerá del anión acompañante predominante. Suelos sódicos con abundancia de sulfato ($SO4^{2-}$) o cloruro (Cl-) pueden tener pH cercano a la neutralidad e incluso ácido (Vázquez 2006), mientras que suelos sódicos con abundancia de carbonato ($CO3^{2-}$) tendrán pH superior a 8 debido a la hidrólisis de este anión.



pH actual (1:2.5) pH hidrolítico (1:10)

Figura 4. Esquema del equilibrio suelo-solución, señalando los diferentes iones evaluados en la medida de pH actual y pH hidrolítico.

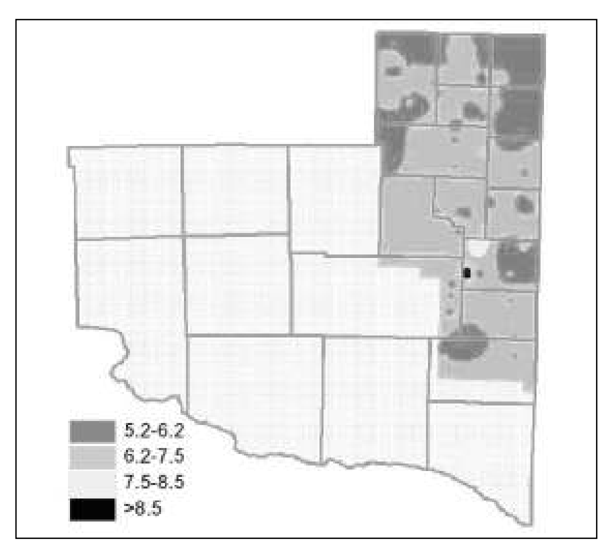


Figura 5. Distribución de los valores de pH en pasta de saturación en la RSP (Romano y Roberto 2007).

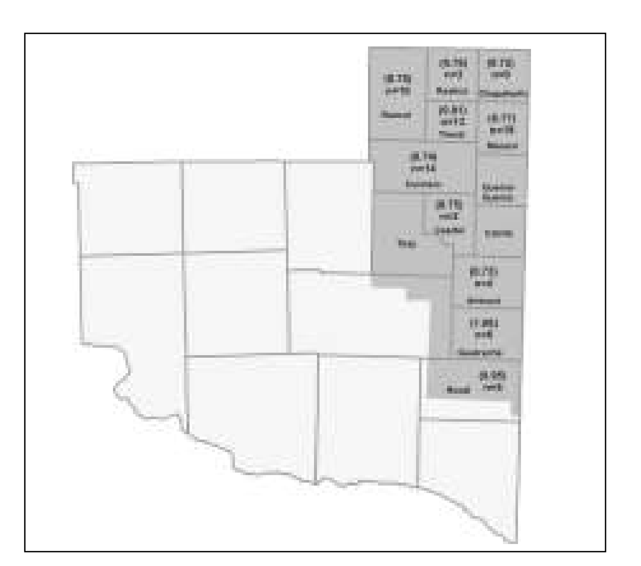


Figura 6. Diferencias entre los promedios de pH actual y potencial por departamento. n= número de muestras.

Valores de pH en la RSP

La mayor parte de la RSP está representada por valores de pH que oscilan entre 6,2 y 7,5 en los cuales no existiría ningún tipo de restricción para el establecimiento y la producción de cultivos y pasturas. Sin embargo, existen áreas (norte de Rancúl, oeste de Conhelo, y de la Planicie medanosa Chapaleufú, Maracó y este de Atreucó) con valores ligeramente ácidos, entre 5,2 y 6,2 (Figura 5), donde se presentarían limitantes principalmente para las leguminosas como la alfalfa y soja, las cuales son sensibles a la acidez. La acidez puede afectar a los cultivos por toxicidad por aluminio y/o manganeso, inhibición de la fijación biológica del nitrógeno y restricciones en el crecimiento radicular y/o afectando la nutrición fosfatada, (Marschner 1995). Estos valores para los departamentos de Chapaleufú y Maracó se justificarían ya que se trata de una región con un proceso de agriculturización muy importante (Romano y Roberto 2007). Los valores de pH en la zona agrícola de la Región Semiárida Pampeana (RSP), se observan en la Figura 5. Para medir el potencial de acidificación de un suelo es necesario contar con datos de pH potencial. En el año 2007, se realizó un análisis exploratorio de muestras provenientes de varios departamentos de la provincia de La Pampa. Las diferencias de los promedios por departamento entre pH actual (pH 1:2,5) y potencial (pH KCl 1M) fueron entre 0,55 y 1,08 unidades, reflejando la variabilidad de la acidez intercambiable de estos suelos (Tabla 3; Figura 6).

Departamento	N° de muestras	X [1] pH actual	X [1] pH potencial	ΔpH [2]
Atreucó	4	6,31	5,57	0,73
Capital	2	7,89	7,14	0,75
Chapaleufú	9	6,68	5,96	0,72
Conhelo	14	6,73	5,99	0,74
Guatraché	6	7,19	6,12	1,08
Hucal	5	7,84	6,89	0,95
Maracó	19	6,46	5,69	0,77
Rancul	10	6,71	5,96	0,75
Realicó	3	6,78	6,01	0,76
Trenel	13	6,86	6,05	0,81
Utracán	5	6,47	5,92	0,55

[1] promedio calculado por departamento para cada determinación.
[2] ΔpH = pH actual – pH potencial

Tabla 3. Valores de pH actual y pH potencial agrupadas en muestras de la planicie medanosa.

El valor mínimo de pH potencial medido es de 5,57, y el de pH actual es de 6,31 indicando que la acidificación no sería una problemática a tener en cuenta en el largo plazo en los cultivos producidos en esa zona. Estudios recientes realizados en diferentes tipos de suelos de Argentina (Iturri et al. 2011) muestran que el pH actual fue 1,14 puntos mayor que le pH potencial ($p<0,01$) en todos los sitios de ambientes húmedos, indicando un proceso natural generalizado de acidificación. En suelos de ambientes más secos las diferencias entre pH actual y potencial, en promedio, fueron de 1,21 lo que indicaría una acidificación más intensa. El cociente entre «precipitación media anual: temperatura media anual» explicó entre un 60 y un 80 % de la variabilidad de estos valores de pH. Este proceso degradativo del suelo sugiere un impacto sobre el rendimiento de cultivos estivales en la Región Pampeana. Pérez Habiaga et al. 2012, demostraron que el pH del suelo afectó la producción de biomasa y el crecimiento de raíces de cultivos de maíz y soja, a valores de pH del suelo inferiores a 5.5, tal como se indica en la Figura 7.

La Figura 7 a) muestra que la producción de materia seca de biomasa aérea (MS) de maíz fue altamente dependiente del valor de pH en todos los suelos ($p<0,01$). Relaciones similares fueron encontradas para soja, la que resultó también altamente sensible al pH del suelo en los 3 sitios de estudio ($p\leq0,01$). Frente a cambios en los valores de pH, la soja fue más sensible que maíz, lo que queda de manifiesto por la mayor pendiente de la relación entre rendi-

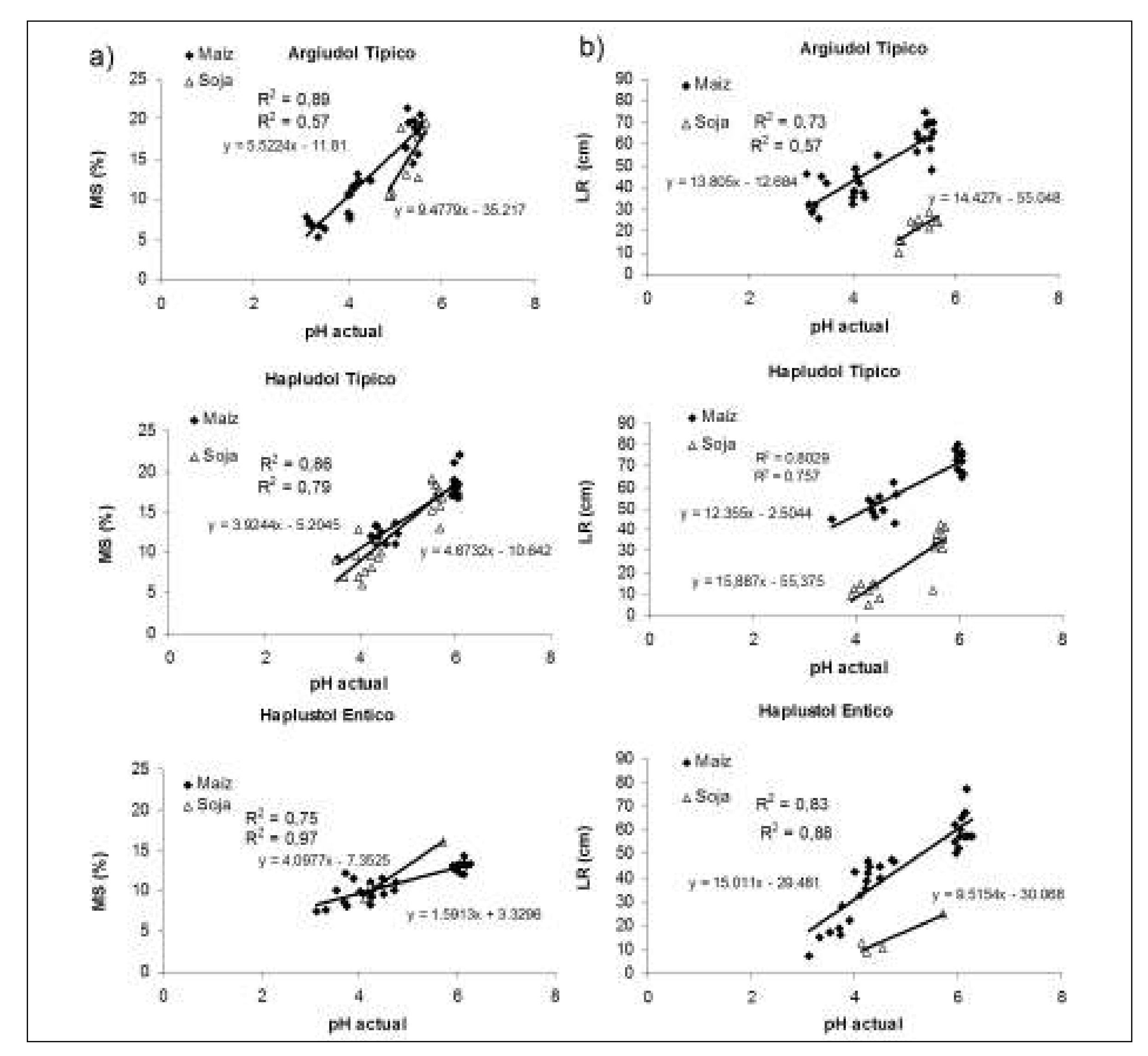


Figura 7. a) Relación entre el pH edáfico y la producción de materia seca aérea (MS), b) relación entre el pH edáfico y la longitud de raíces (LR).

miento de MS y pH, en los tres suelos. En la Figura 7 b) se observa que la longitud de raíces (LR) de ambos cultivos fue altamente condicionada por el pH edáfico en el Argiudol Típico y en el Hapludol Típico ($p \leq 0,01$), mientras que en el Haplustol Entico la relación fue solamente significativa ($p=0,05$). El crecimiento de la raíz mostró un comportamiento similar para los dos cultivos [pendientes estadísticamente similares de maíz y soja: Argiudol Típico ($p>0,90$); Hapludol Típico ($p>0,10$) y Haplustol Entico ($p>0,30$)] en todos los sitios, lo cual indica que el pH afecta en forma similar el crecimiento radicular de ambos cultivos, en todos los suelos.

Las zonas con valores alcalinos (7,5-8,5) a muy alcalinos (>8,5) son áreas muy limitantes para la producción y establecimiento de cultivos y pasturas. Estas áreas tienen un origen natural que corresponde a una asociación de suelos Haplustoles y Calciustoles, dentro del orden de los Molisoles (INTA, 1980). En ellas es importante considerar la posible alcalinización de los suelos, característica de zonas áridas o semiáridas con capas freáticas cercanas. La condición señalada hace que el balance hídrico sea negativo, es decir, alta temperatura y baja precipitación llevan a una tasa alta de evapotranspiración con el consecuente ascenso de sales hacia la superficie del suelo. La composición de las sales determinará la naturaleza del fenómeno, que puede ser de sodificación, salinización o sodificación-salinización. No se dispone de información regional acerca de esta temática, si bien es común la aparición de zonas con problemáticas de acumulación de sales superficiales. Inicialmente, es de suma importancia la determinación de la conductividad eléctrica del extracto de suelo (CE) y de los cationes adsorbidos a los coloides del suelo, a partir de los cuales se realiza el cálculo del Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI). Con estos dos parámetros es posible determinar cual es la problemática específica de un suelo.

Diagnóstico del pH a campo: alcalinidad y acidez

Se detalla a continuación como puede hacerse un diagnóstico rápido en el campo de la acidez y/o alcalinidad de un suelo.

Alcalinidad

- Medida del pH del suelo con pHmetro portátil, en pasta de suelo o solución.
- Empleo de tiras reactivas de pH, que presentan una coloración característica luego de su contacto con el suelo.
- Reacción con fenolftaleína, un indicador químico que presenta coloración rosa a pH >8.
- Reacción del suelo con HCl, que en presencia de CO_3^{2-} libera CO_2, este último puede observarse por formación de pequeñas burbujas.
- Gusto del suelo.
- Presencia de especies resistentes (agropiro, pelo de chancho, lotus).

Para diagnóstico de suelos salinos es útil observar: distribución y estado de los cultivos en explotación (síntomas de toxicidad o deficiencia nutricional), presencia de una capa superficial blanca, aparición de cristales de sales en un terrón de suelo.

Para diagnóstico de suelos sódicos considerar: aparición de eflorescencias negras sobre la superficie (asociado a la dispersión de los coloides orgánicos), presencia de estructuras columnares (prismas de cabeza redondeada) (Vázquez 2006).

Acidez

- Medida del pH del suelo con pHmetro portátil, en pasta de suelo o solución.
- Empleo de tiras reactivas de pH, que presentan una coloración característica luego de su contacto con el suelo.

Bibliografía

- Adema E. O., D. E. Buschiazzo, F. J. Babinec, T. Rucci y V. F. Gómez Hermida. 2003. Balance de agua y productividad de un pastizal rolado en Chacharramendi, La Pampa. Ediciones INTA. EEA Anguil. Publicación Técnica Nº 50.
- Bohn H., B. N. McNeal y G. A O'Connor. 1993. Química del suelo. Editorial Limusa. Primera edición. pp. 233-257.
- Casas R. R. 2005. Efecto de la intensificación agrícola sobre los suelos. Ciencia Hoy. 15(87): 42 43.
- De la Casa A., G. Ovando, A. Rodríguez, L. Bressanini y E. Buffa. 2003. Evaluación espacial del nitrógeno disponible del suelo en un cultivo de papa cv. spunta en Córdoba, Argentina. Agric. Técnica. 63 (3).
- Echeverría H. E., H. R. Sainz Rozas, P. Calviño y P. Barbieri. 2001. Respuesta del cultivo de trigo al encalado. V Congreso Nacional de Trigo y III Simposio Nacional de Cultivos de Siembra Otoño Invernal. Carlos Paz- Córdoba. Actas en CD.
- Galantini J. A., L. Suñer y H. Kruger. 2005. Dinámica de las formas de P en un Haplustol de la región semiárida pampe-

ana durante 13 años de trigo continuo. RIA. 34(2) artículo Nº2.
• INTA-Gobierno de La Pampa y UNLPam. 1980. Inventario integrado de recursos naturales de la provincia de La Pampa, ISAG. Buenos Aires, pág 493.
• Iturri L. A., D. E. Buschiazzo y M. Díaz-Zorita. 2011. Evidencias de acidificación de suelos de la Región Central de la Argentina bajo siembra directa. Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Volumen 29(1) pp 13-19.
IRAM (Instituto de Normalización). 1999. Norma 29 410. Determinación del pH.
• Kloster N. S., M. P. Azcarate, F. J. Babinec y A. Bono. 2007. Comparación de técnicas de medición del pH del suelo: pH en pasta de saturación y en relación suelo:agua 1:2,5. Enviado al Congreso Argentino de las Ciencias del Suelo. San Luis, Mayo-2008.
• Marschner H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press. Second Edition, 889 p.
• Montoya J. C. 1999. Fitotoxicidad de los fertilizantes nitrogenados aplicados en la línea de siembra. Informe de Beca para iniciación de graduados, EEA INTA Anguil.
• Pérez Habiaga G., D. E. Buschiazzo y M. Díaz-Zorita. 2012. pH edáfico y rendimiento de cultivos estivales en la región pampeana. Enviado al Congreso Argentino de las Ciencias del Suelo. Mar del Plata, Abril-2012.
• Picone L. 2005. Propiedades del suelo relacionadas con la fertilidad. Capítulo 1. In: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Ed: H. Echeverría y F. García. Ed. INTA, pp 3-18.
• Porta Casanela J., M. López-Acevedo Reguerín y C. Roquero de Laburu. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa. pp 217-236.
• Quiroga A., M. Saks, R. Fernández, D. Funaro y A. Bono. 2006. Informe de avance. Módulo investigación de larga duración. Proyecto fertilizar
• Romano N. y Z. Roberto. 2007. Contenido de fósforo extractable, pH y materia orgánica en los suelos del este de la provincia de La Pampa. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. 3:1-6.
• SAMLA (Sistema de apoyo metodológico a los laboratorios de análisis de suelos, agua, vegetales y enmiendas orgánicas). 2004. pH del suelo. SAGyP, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Versión en CD.
• Sorensen S. P. L. 1909. Enzyme studies: ll. The measurements and important of the hydrogen ion concentration in enzyme reaction. Compt. Rend. Trav. Lab. Calrsberg. 8:1.
• Tisdale S. M., N. L. Wernwer and J. D. Beaton. 1985. Soil fertility and fertilizers. Editorial MacMillán. Cuarta edición. pp. 484-425.
• Vázquez M. E. 2005. Acidez del suelo. En: Tecnologías en análisis de suelos. Liliana Marbán y Silvia Ratto. Buenos Aires: AACS. pp: 69-88.
• Vázquez M. E. 2006. Calcio y magnesio. Acidez y alcalinidad de los suelos. En Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. H.E. Echeverría y F.O. García (eds). Editorial INTA. Buenos Aires. Argentina. pp. 161-189.

Alberto Quiroga, Alfredo Bono e Ileana Frasier

Materia orgánica del suelo

La calidad del suelo es uno de los factores más importantes en el sostenimiento global de la biosfera y en el desarrollo de prácticas agrícolas sustentables (Wang y Gong 1998). Los estudios parecen orientarse decididamente a identificar, en distintas regiones del mundo, indicadores confiables y sensibles que permitan estimar el estado actual y las tendencias en la calidad de suelos como paso fundamental para definir sistemas de producción sustentables (Reeves 1997). Identificar propiedades edáficas discriminantes e incorporarlas a métodos de evaluación y de diagnóstico resulta prioritario para establecer estrategias de manejo conservacionistas. La sensibilidad, el carácter predictivo, la independencia respecto de otras propiedades, la practicidad para su determinación y extrapolación, constituyen algunas de las características que debe reunir un indicador edáfico,

Si bien los indicadores físicos, químicos y biológicos no determinan independientemente la calidad del suelo, la mayoría de los estudios coinciden en que la materia orgánica (MO) es el principal indicador e indudablemente el que posee una influencia más significativa sobre la calidad del suelo y su productividad. Los suelos de la Región Semiárida Pampeana (RSP) se caracterizan por presentar bajos contenidos de arcilla que dan como resultado un pobre desarrollo de la estructura con agregados de media a baja estabilidad. En estas condiciones resulta significativa la influencia de la MO, principalmente sobre propiedades físicas vinculadas a la dinámica del agua. Por consiguiente, es necesario reconocer la fragilidad de los suelos de la región y los importantes cambios que normalmente tienen lugar por influencia del manejo. Durante los últimos 15 años, tanto en la RSP como en el mundo, se han intensificado los estudios que tratan de interpretar los cambios cuantitativos y cualitativos en la MO influenciada por distintas prácticas de manejo. Como así también las consecuencias de cambios en la MO sobre otras propiedades físicas, químicas y biológicas. En general se coincide en un efecto diferencial del manejo sobre las fracciones de MO, con mayor incidencia sobre las fracciones más lábiles.

De esta manera, los contenidos de MO total y sus fracciones se han constituido en importantes atributos de la calidad del suelo (Gregorich et al. 1994) y frecuentemente los más reportados en estudios de larga duración tendientes a evaluar la sustentabilidad agronómica (Reeves 1997). Al respecto, Kapkiyai et al. (1999) señalaron que la fracción joven de la MO (MOj) resulta clave para interpretar cambios en la fertilidad del suelo y potencialmente puede ser utilizada como un índice de calidad de los mismos. De similar manera, Biederbeck et al. (1998) comprobaron que fracciones lábiles de la MO fueron indicadores más sensibles a los cambios en la calidad del suelo que el CO y N total. Esta fracción estaría compuesta principalmente por fragmentos de raíces parcialmente descompuestas (Cambardella y Elliott 1993). Cambardella y Elliott (1994) y Beare et al. (1994) comprobaron un efecto positivo de la siembra directa (SD) sobre el contenido de MO, especialmente la fracción lábil. Quiroga et al. (1996), comprobaron sobre Haplustoles Enticos que la fracción más estable de la MO (<50µm) se relacionó con el contenido de arcilla, mientras que la MOj (100-2000 µm) fue significativamente influenciada por el manejo. Similares resultados fueron obtenidos por Fabrizzi et al. (2003) quienes comprobaron, en un Paleoudol Petrocálcico, una mayor influencia de las labranzas sobre fracciones de 53 a 2000 µm. Esta influencia se registró en los primeros 7,5 cm del perfil, mientras que no se comprobó efecto de 7,5 a 15 cm.

Campbell et al. (1999) al evaluar los efectos de labranzas y frecuencias de barbechos comprobaron que la fracción lábil y no el contenido total de N y MO resultaron más sensibles a los distintos tratamientos. Este incremento en la fracción joven de la MO resultó dependiente del aporte anual de residuos de cultivos. Sobre este punto, Unger et al. (1997) con-

cluyeron que solamente cuando es adecuada la cantidad de residuos, la labranza conservacionista es altamente efectiva para conservar el suelo, proteger su MO y evitar la pérdida de agua.

Boehm y Anderson (1997) comprobaron que al reducirse el período de barbecho, mejoró la calidad del suelo como consecuencia de una mayor frecuencia del aporte de residuos que al incrementar la fracción de MO lábil modificaron la condición física (menor densidad aparente y mayor agregación del suelo). Estos cambios físicos afectarían significativamente la tasa de mineralización y los contenidos de la MO (Schimel et al. 1985) y en mayor grado la tasa de mineralización del N (Hassink 1993), condicionando significativamente la productividad de los cultivos. Dada la multiplicidad de factores que intervienen, Parr y Papendick (1997) señalan que es conveniente identificar y cuantificar indicadores de calidad de suelo para las condiciones específicas de cada sitio. Al respecto se ha comprobado que el valor crítico de un indicador puede variar ampliamente entre series de suelos (Thomas et. al. 1997) y entre sitios diferenciados por el régimen de humedad (Dalal y Mayer, 1986) y temperatura (Amelung et al. 1999; Hevia et al. 2003).

En Haplustoles y Hapludoles de la Región Semiárida y Subhúmeda Pampeana (RSSP), distintos estudios han planteado como una de las principales hipótesis que los contenidos de MO resultan principalmente dependientes de factores relacionados con el régimen hídrico de los suelos (precipitaciones, capacidad de retención de agua y granulometría) y con el manejo de residuos (sistema de producción, secuencia de cultivos, sistema de labranza, fertilización). Variaciones en las precipitaciones promedios, en la capacidad de retención de agua (CRA) y en la granulometría, condicionarían los cambios en la calidad de los suelos, productividad de los cultivos y consecuentemente la extrapolación de los resultados entre sitios.

El objetivo del presente Capítulo es tratar sobre la composición de la MO, analizar los efectos de distintos factores (precipitaciones, CRA, granulometría y manejo) sobre los contenidos, secuestro y dinámica del CO, poniendo énfasis en los sistemas de producción de la RSP.

Composición de la MO de los suelos

La materia orgánica de los suelos, en sentido amplio, está constituida por todas las sustancias carbonadas orgánicas del mismo. Es un continuo desde materiales vegetales frescos sin descomponer, como una hoja, hasta cadenas carbonadas muy transformadas y estables como los ácidos húmicos. En forma simplificada se la puede considerar compuesta por dos componentes: los residuos vegetales y la MO humificada o humus. Los residuos vegetales de las plantas herbáceas tienen en promedio un 40 % de carbono en su composición, mientras que la MO humificada del horizonte A de los suelos tiene en promedio un 58 % de carbono. Este porcentaje es bastante estable por lo que comúnmente es indistinto hablar de materia orgánica humificada o carbono del humus. Del total de compuestos orgánicos del horizonte A de un suelo los residuos representan generalmente entre 5 y 15 % siendo humus la casi totalidad de la MO. A su vez, mientras la cantidad de residuos cambia rápidamente en períodos de semanas o meses, el contenido de humus lo hace lentamente, en períodos de años, décadas o siglos (Álvarez 2005).

Régimen hídrico y MO

Los factores que inciden sobre el régimen hídrico resultan principales condicionantes de la actividad biológica en regiones semiáridas. Es importante la influencia que variaciones en las precipitaciones, composición granulométrica y espesor de los suelos y de las napas poseen sobre la productividad de los cultivos y en consecuencia sobre la calidad de los suelos de la RSP. La Figura 1a permite inferir la significativa influencia que la variación de la precipitación promedio (680-850 mm) posee sobre los contenidos de MO (1,53-2,83 %) y sobre el rendimiento de los cultivos en Haplustoles y Hapludoles de la RSSP. Estas diferencias entre regiones se comprobaron tanto en los tratamientos testigos como en los fertilizados. La influencia del factor precipitaciones sobre los contenidos de MO también fue considerada por Dalal y Mayer (1986). Comprobaron que el manejo afectó significativamente el contenido de la MO, pero dentro de cada manejo los contenidos de MO variaron en función de las precipitaciones (Figura 1b). De esta manera un suelo cultivado puede presentar, en función de su régimen hídrico, mayor contenido de MO que un suelo virgen.

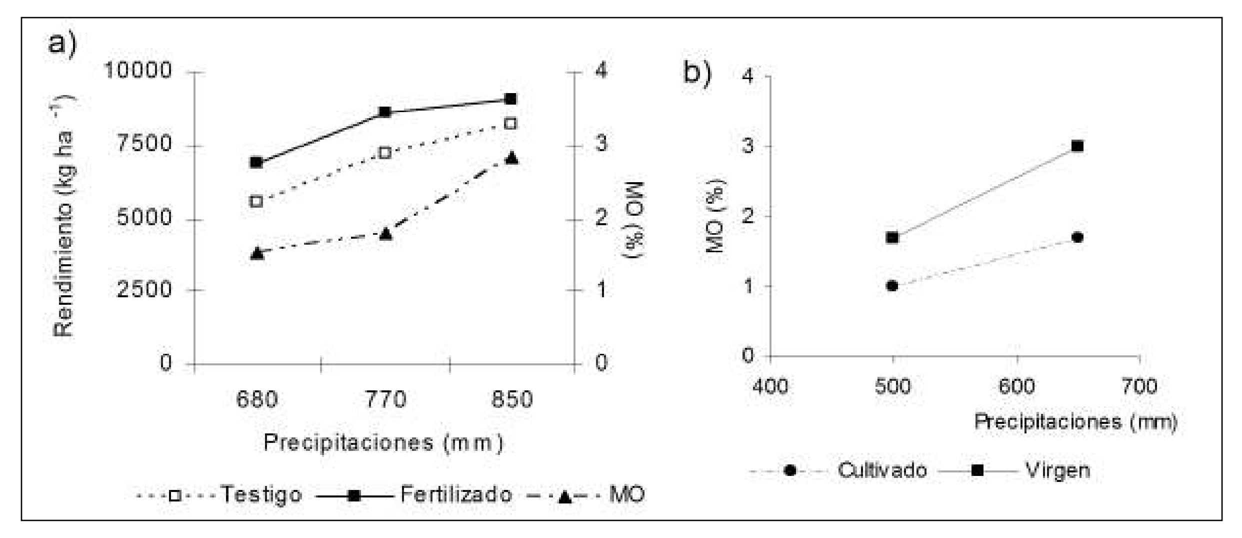


Figura 1. a) Relación entre precipitaciones, materia orgánica (MO) y rendimientos de maíz con y sin N; b) Efecto del manejo y las precipitaciones sobre la MO. a) Adaptado de Funaro et al. 2004 y b) adaptado de Dalal y Mayer 1986

Capacidad de retención de agua y MO

Como se mencionó anteriormente, la interacción entre clima y suelo determina el rendimiento y la producción de biomasa de los cultivos y, por ende, incide sobre el nivel de MO de los suelos. La CRA presenta un amplio rango de variación entre suelos de la RSP, resultando en principal determinante de variaciones en la disponibilidad de agua en áreas bajo el mismo régimen de precipitaciones. Los resultados de nuestro estudio mostraron estrecha relación entre CRA y el rendimiento de grano y materia seca de centeno (Tabla 1), entre CRA y contenido de MO (Figura 2a). Ambas relaciones confirman la significativa influencia que la CRA posee sobre la eficiencia de uso del agua, la productividad de los cultivos y los contenidos de MO. Similares resultados fueron obtenidos por Lampurlanes et al. (2002), quienes evaluaron la eficiencia de almacenaje de agua durante el barbecho sobre dos suelos con CRA contrastante (80 mm y 268 mm) y sometidos a distintos sistemas de labranza. Comprobaron que en el suelo con menor CRA la eficiencia de almacenaje fue baja y esto condicionó que no se registraron diferencias entre sistemas de labranza.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Mc Aneney y Arrúe (1993) quienes comprobaron una escasa contribución del agua almacenada durante el barbecho en suelos con baja CRA. También Quiroga et al. (2005), comprobaron que en Haplustoles Enticos con baja capacidad de almacenaje de agua útil (AU: 42 mm) no se registraron diferencias (en AU y N-nitratos) entre hacer o no hacer barbecho, mientras que en suelos de mayor AU (90 y 210 mm) las diferencias fueron significativas (Figura 2b).

Espesor del suelo

A la influencia de las precipitaciones y de la composición granulométrica se suma la correspondiente al espesor del suelo. Los efectos de este factor sobre los sistemas de producción en general y sobre los contenidos de MO ha sido evaluado en un amplio rango de situaciones estableciéndose diferentes clasificaciones de capacidad de uso (Klingebiel y

Tabla 1. Efecto de la capacidad de retención de agua sobre los contenidos de materia orgánica y producción de centeno en Haplustoles Enticos de la RSSP.
Letras distintas presentan diferencias significativas (Test de Tukey)

	Capacidad de Retención de Agua (CRA)		
	Baja	Media	Alta
Prof. (cm)	76 (n 11)	123 (n 16)	187 (n 18)
CRA (mm)	115	204	368
MO (%)	1,31 a	1,47 b	1,94 c
MS (kg ha^{-1})	1652 a	1969 ab	2562 b
Rendimiento (kg ha^{-1})	588 a	757 ab	1049 c
N en grano (kg ha^{-1})	15,8 a	19,4 b	25,2 c

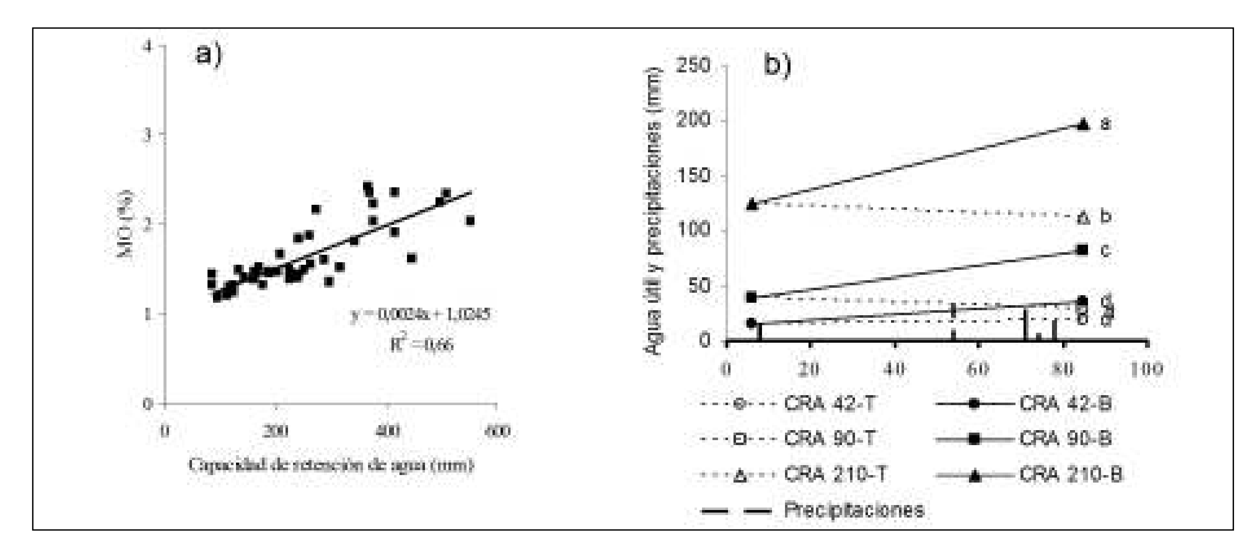


Figura 2. a) Efecto de la CRA sobre la MO de Haplustoles Enticos (RSSP); b) Efecto de la CRA del suelo sobre el agua útil almacenada durante el barbecho. Capacidad de retención de agua (CRA); Materia orgánica (MO); B= barbecho, T= sin barbecho. Letras distintas indican diferencias al 5%. (adaptado de Quiroga et al. 2005)

Montgomery 1961; Riquier et al. 1970; Puricelli et al. 1997) y/o espesores críticos para los cultivos (Sys y Frankart 1971; Bravo et al. 2004). En nuestros estudios no se comprobó relación entre contenidos de MO y espesor del suelo (variable entre 40 y 250 cm) a nivel de lote (el mismo manejo). Sin embargo, la relación resultó significativa cuando los distintos espesores fueron agrupados considerando la composición granulométrica de los suelos. Suelos de similar espesor variaron los contenidos de MO en función de la proporción de arcilla + limo. Por ejemplo en perfiles con espesores de 140 cm los contenidos de MO resultaron de 0,59 y 1,16% para contenidos de arcilla + limo de 13 y 35%, respectivamente. Estos resultados plantean restricciones para el uso de clasificaciones de suelos por espesor en la medida que no se consideren variaciones en la granulometría.

Granulometría, MO, Manejo

Cuando se evalúa la influencia del manejo en suelos de la RSP resulta de particular importancia tener en cuenta la influencia de variaciones en el coloide inorgánico. La Figura 3a muestra la distribución de los 120 suelos evaluados en función de los contenidos de arcilla+limo y MO. Se comprobó mayor rela-

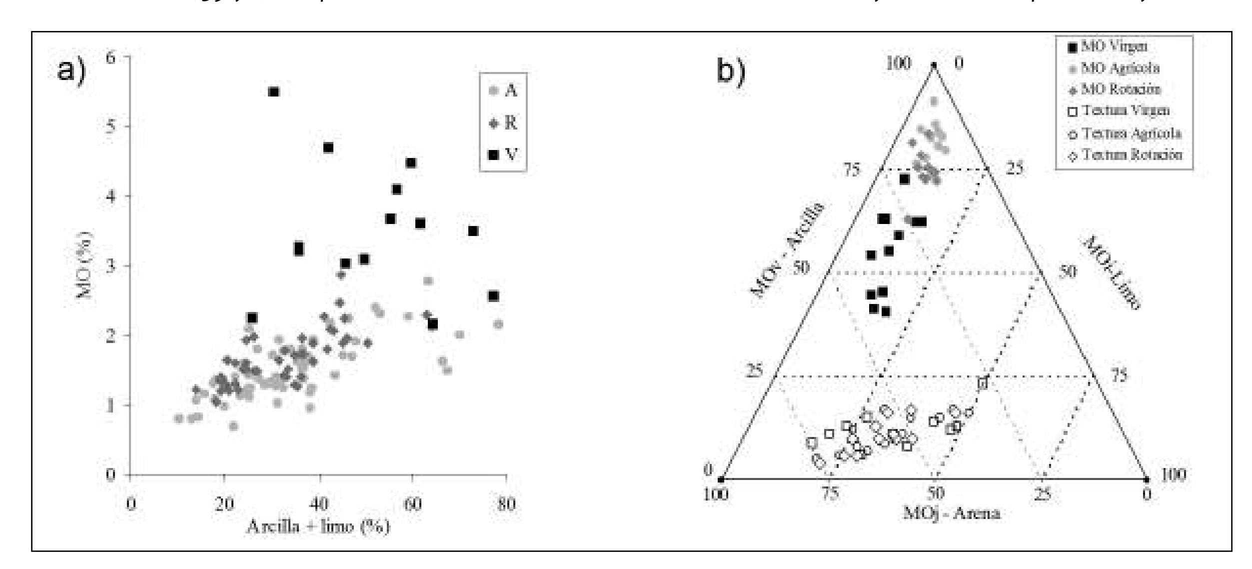


Figura 3. a) Efecto de la granulometría y el manejo sobre los contenidos de MO en Haplustoles Enticos (RSSP); b) Distribución de suelos bajo tres manejos en función de la granulometría y fracciones de la MO. A: Agrícola, R: Rotación, V: Virgen; granulometría (arcilla, limo y arena), fracciones de la materia orgánica (MO= MOv, MOj, MOi) (Adaptado de Quiroga 2002).

ción entre ambos coloides en los suelos A (r=0,83) y R (r=0,72) que en suelos V (r=0,23). Este comportamiento se debería a un efecto diferencial del manejo sobre distintas fracciones de MO.

La Figura 3b muestra que los suelos A poseen comparativamente mayor contenido de MOv, aproximadamente un 90% de la MO total. Se verificó además que los contenidos de MOv prácticamente no se han modificado por el manejo y que de esta manera la MO total en los suelos cultivados se encuentra principalmente constituida por MOv, y consecuentemente más relacionada con variaciones en los contenidos de arcilla + limo. Al respecto, Casanovas et al. (1995) señalaron que como consecuencia de la descomposición de la fracción liviana quedan como remanente formas más estables de la MO. Al comparar la relación entre MOj/MO total en suelos cultivados (13,3%), rotación (19,4%) y vírgenes (49,4%) puede inferirse sobre la significativa influencia del manejo en Haplustoles Enticos de la RSP. La Figura 4 muestra los efectos del manejo y la granulometría sobre los contenidos de las distintas fracciones de MO y residuos > 2 mm. Independientemente de la granulometría, el manejo afectó en orden de importancia los contenidos de MOj, residuos, MOi, MOv. Respecto a esta última fracción, en suelos de granulometrías más finas no se observaron diferencias entre manejos. Posiblemente el mayor contenido de arcilla y una estructura más desarrollada determinen una mayor protección física de la MO, en suelos de granulometría más fina.

Si bien estos resultados muestran diferencias significativas (P<0,01) en los contenidos de MO entre manejos, por efecto de la textura, analizando los resultados mediante la prueba de aditividad de Tukey (1949), se comprueba interacción significativa entre suelos (granulometría) y manejo (P<0,01). Por lo tanto, los efectos de distintos manejos no pueden generalizarse en la medida que no se consideren suelos de similar granulometría. Solo de esta manera puede comprenderse que suelos A (con 50% de arcilla+limo y MO= 1,71%) posean mayor contenido de MO que suelos R (con 30% de arcilla+limo y MO = 1,40%). Al efectuar el mismo análisis sobre los contenidos de MOj, no se observó efecto de aditividad con arcilla + limo.

A fin de minimizar los efectos de variaciones en la textura puede resultar adecuado el uso de índices, como MO/a+l (Pieri 1995) o el índice de estratificación de la MO (Franzluebbers 2002). Los resultados confirman que las principales diferencias entre suelos A tiene lugar en los contenidos de MOv (asociada a fracciones granulométricas menores de 50 µm), es decir en diferencias de textura. Por otra parte se comprobó, a partir de los contenidos de MOj y no de MO total, que el manejo A ha tenido similar efecto en suelos de la RSP, independientemente de algunas diferencias granulométricas. Los bajos contenidos de MOj podrían estar indicando un cierto equilibrio aparente en los contenidos de MO total de los suelos A. Este equilibrio puede inferirse solo a partir de los contenidos de MOj que resultan similares entre suelos y no a partir de los contenidos de MO total que resultan variables por influencia de variaciones en la granulometría sobre los contenidos de MOv (Figura 5).

Otra dificultad, es que la mayoría de los trabajos que evalúan efectos del manejo sobre los contenidos de

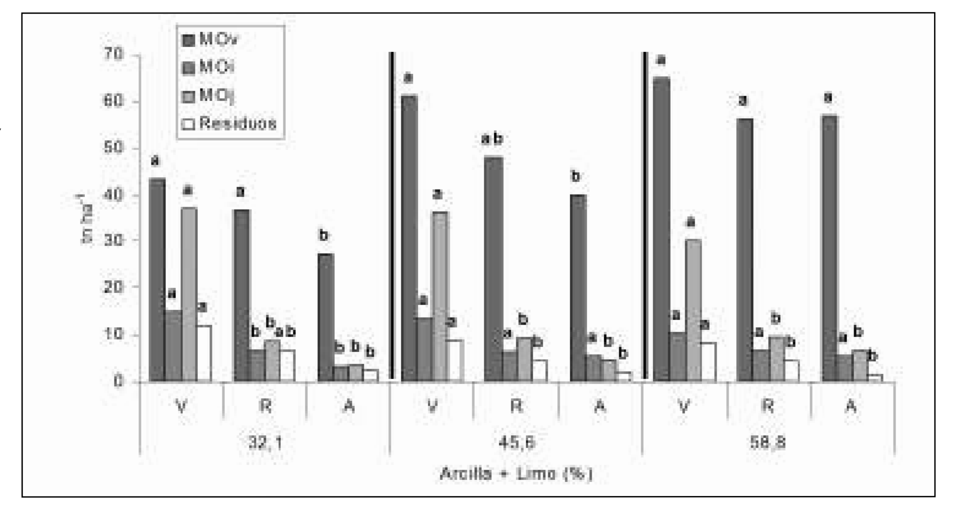


Figura 4. Efecto del manejo y la granulometría sobre distintas fracciones de la materia orgánica y residuos mayores de 2 mm.

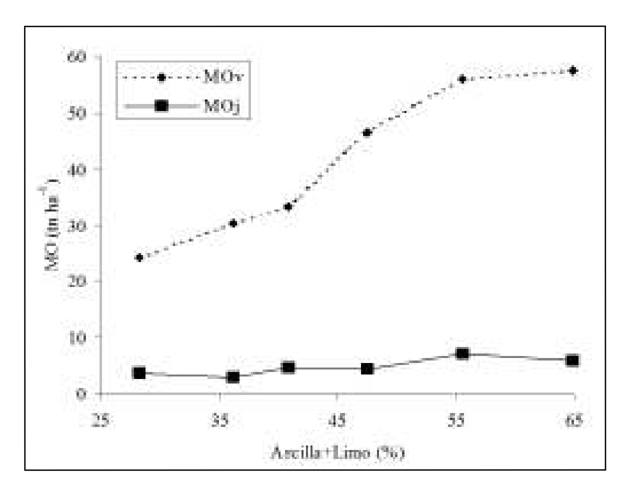


Figura 5. Contenidos de materia orgánica vieja y materia orgánica joven en suelos bajo agricultura continua (A) y distintos contenidos de arcilla+limo.

MO frecuentemente no consideran los cambios que ocurren en la masa de los mismos por variaciones en la DA (Carter et al. 1998). De esta manera, pueden observarse diferencias significativas en el porcentaje de MO que se anulan al considerar la masa del suelo. Teniendo en cuenta este aspecto, se comprobó una reducción en suelos A del 20%, 63% y 88% en los contenidos de MOv, MOi y MOj respecto de suelos V.

Propiedades físicas y MO

Si bien se comprobó efecto del manejo sobre algunas propiedades físicas, los niveles alcanzados por las mismas resultaron dependientes de la granulometría, mostrando estrecha relación con los contenidos de arcilla+limo (Figura 6a y 6b). En suelos con menor contenido de MO se comprobó una mayor influencia de la granulometría sobre propiedades físicas. Así, la DAmáx y el umbral hídrico de mayor sensibilidad a la compactación fueron mas influenciados por los contenidos de arcilla+limo en los suelos A (r = -0,81 y 0,76) que en suelos V (r = -0,64 y 0,62). Se comprobó además que los efectos del manejo condicionaron la relación entre propiedades físicas y granulometría, principalmente por cambios en los contenidos de MO. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Davidson et al. (1967). Esta influencia se debería a que la MO induce un aumento del tenor de agua en el umbral hídrico de sensibilidad a la compactación y una disminución de la densidad con aumento del contenido de agua en la tenacidad máxima (Guerif y Faure, 1979; Quiroga et al. 1999).

Secuestro de carbono

El C entra al sistema vía fotosíntesis, una porción de los asimilatos de C es respirado directamente por los cultivos, otra porción es removida por las cosechas y el remanente entra al suelo como descomposición de las plantas (rastrojo, raíces y exudados) (Janzen et al. 1998). La acumulación de C en el suelo vuelve gradualmente a convertirse en CO_2 a través de la descomposición microbiana y la respiración, con lo que se completa el ciclo. Comparando muchos ecosistemas, el ciclo del C en los sistemas agrícolas es relativamente abierto. Por ejemplo, muchas praderas son subsidiadas por energía fósil, con liberación de CO_2 a la atmósfera. Además muchos agroecosistemas

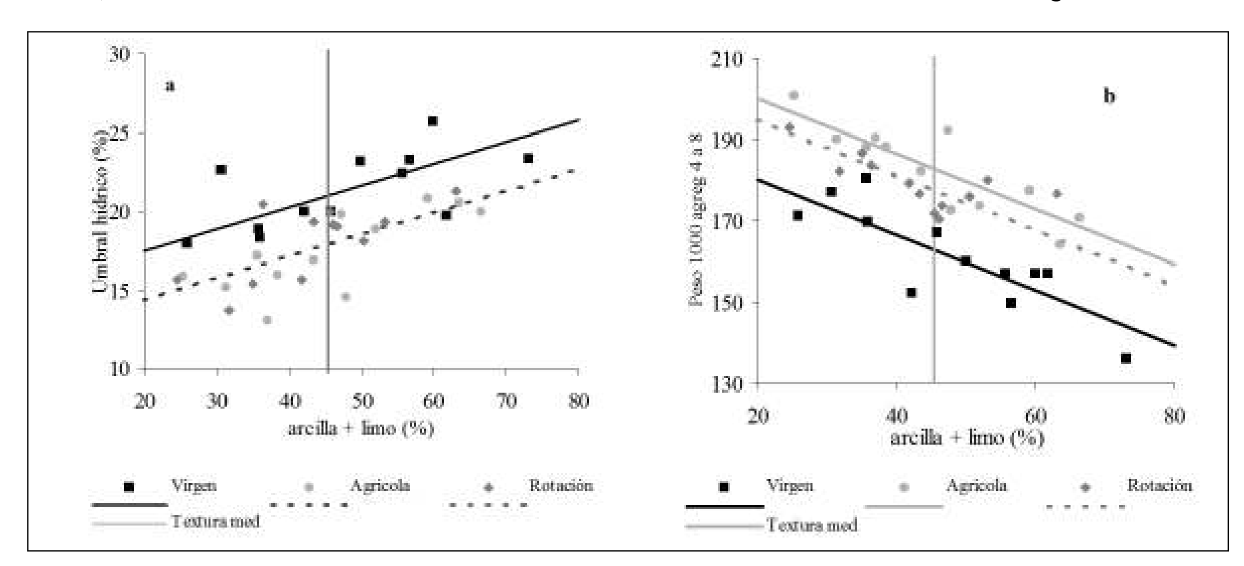


Figura 6. a) Efecto de la granulometría y el manejo sobre el umbral hídrico de mayor sensibilidad a la compactación y b) sobre el peso de agregados de 4 a 8 mm.

exportan CO, que es finalmente respirado, vía consumo humano, aunque a través de pequeñas porciones ese CO puede ser eventualmente retornado al sistema (residuos cloacales). Durante los estados tempranos en la génesis del suelo bajo campo natural el ritmo de ingreso de C excede la descomposición, resultando en la acumulación de C. Si la descomposición es relativamente acelerada, supera al ingreso de C y el CO declina, y si se produce lo inverso, aumenta

Las labranzas tradicionales con barbechos en las Grandes Planicies de EEUU han producido un continuo descenso del contenido de CO y NO. Las pérdidas de la MO original han sido estimadas en más del 60 % después de 50 años de cultivos. En períodos relativamente cortos (20 años) el efecto de las labranzas también fue causa de la reducción potencial de C y N mineralizable y restringió la habilidad del suelo para inmovilizar y conservar el N mineral. La literatura disponible indica que el secuestro potencial de CO tiene un rango de conversión en labranza conservacionista de 0,1 a 0,5 tn ha^{-1} $año^{-1}$ para regiones húmedas y 0,05 a 0,2 tn ha^{-1} $año^{-1}$ para regiones semiáridas (Paustian et al. 1997). Reducir las labranzas ha tenido como resultado un aumento de C y N potencialmente mineralizable, donde la población microbiana fue menos limitada comparada con los otros sistemas de labranza. Con altas temperaturas, el contenido de C en el suelo decrece porque hay una más intensa mineralización de la MO (Kirschbaum 1995).

En la RSSP los sistemas de producción son mixtos, basados en rotaciones de cultivos anuales y pasturas perennes en base a leguminosas, siendo la más común de éstas la alfalfa. Sin embargo, durante los últimos 50 años se usaron sistemas intensivos de labranza introducidos de zonas más húmedas y como resultado de esto se produjo una moderada a severa degradación de los suelos debida a erosión hídrica y eólica. En los últimos años se ha observado que hay una tendencia aún mayor a la agriculturización, decrece la MO y la estabilidad de los agregados, y se incrementa la susceptibilidad a las compactaciones (Quiroga et al. 1996). Este fenómeno se vió facilitado por un aumento en las precipitaciones que permitieron incorporar a los sistemas productivos cultivos como el girasol y más recientemente la soja.

Es posible definir a este agroecosistema como muy frágil, principalmente frente a las acciones antrópicas adversas que se han impuesto en reiteradas oportunidades. Ensayos realizados por Buschiazzo et al. (1998) con sistemas de labranza durante 5 a 11 años en la RSSP demostraron que las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo fueron mejorando por los sistemas de conservación por la gran cantidad de residuos retenidos superficialmente. Los cambios en el contenido de MO y la estabilidad de agregados fueron limitados a la parte superficial del suelo (2,5 a 5 cm), cuando se consideraron profundidades mayores a 15 cm el efecto de los sistemas de labranza desapareció. La acumulación de MO con sistemas conservacionistas fue mayor en las regiones subhúmedas que en las semiáridas. Esto fue atribuido a una mayor deposición de residuos en las zonas subhúmedas y un mayor ritmo de mineralización en las zonas semiáridas (Buschiazzo et al. 1998). En otro estudio, realizado por Díaz-Zorita et al. (1999) en la RSP durante tres años en más de 130 sitios, se demostró la importancia de la prácticas culturales para minimizar las pérdidas de C del suelo. Estos autores concluyeron que la productividad del trigo esta correlacionada positivamente con el contenido de MO en los primeros 20 cm del suelo cuando esta fue menor a 72,2 t ha^{-1} y en años húmedos la producción está limitada por la disponibilidad de N y P. Por último, en experiencias realizadas por Buschiazzo et al. (2001) comparando suelos vírgenes (bajo monte de Caldén) y cultivados de la RSP indican que en los suelos cultivados decrece el contenido de CO, PO (orgánico) y PI (inorgánico) dependiendo del tamaño de agregados (más finos) en las texturas finas y arenosas. La absorción de las plantas y la erosión eólica fueron probablemente la causa del descenso del contenido de nutrientes de estos suelos.

La descomposición de residuos depende principalmente de la temperatura y la humedad (Stott et al. 1990, Douglas y Rickman 1992, Steiner et al. 1994). Los efectos sobre los microorganismos del suelo se reflejan también sobre la dinámica del N ya que está gobernada por la actividad microbiana. Al efectuar una labranza se produce un pulso de actividad microbiana debido a la exposición de los compuestos carbonados disponibles para los microorganismos. La menor descomposición de residuos en SD respecto a la labranza convencional (LC), puede influir sobre el nivel de nitratos del suelo y la disponibilidad de los mismos para los cultivos. El agregado de sustratos carbonados con relación C/N mayor a la de la biomasa microbiana del suelo, puede llevar a que mientras parte del carbono se elimina como C-CO2, se produz-

Sistema de labranza	Coeficientes de regresión C_L	k_L	C_R	k_R	Coeficiente de determinación
Siembra directa	32.2 a	0.0133 a	67.4 a	0.00114 a	0,96
Arado de disco	33.5 a	0.0432 b	66.5 a	0.00218 b	0,96

Tabla 2. Coeficientes de regresión y determinación del carbono labil y recalcitrante y sus constantes de descomposición (k) del modelo doble exponencial de los datos de descomposición de los residuos.

ca a la vez inmovilización de N del medio por los microorganismos. En un ensayo de larga duración en la EEA Anguil INTA se determino cómo afectaban los sistemas de labranza la descomposición y liberación de N de los residuos de cosecha en un Haplustol Entico de la RSP. La cinética de la descomposición de residuos fue representada bien por el modelo de doble exponencial de decaimiento (Ecuación 1, Tabla 2).

Ecuación 1, carbono

$$C\ remanente = C_L\ e^{-bt} + C_R\ e^{-dt}$$

Donde:
Carbono remanente = Carbono en residuos sin descomponer.
T: tiempo de descomposición.
CL = porcentaje de carbono en la fracción labil del residuo.
CR = porcentaje de carbono en la fracción resistente del residuo.
b y d = constantes de descomposición de las fracciones labil y resistente respectivamente.

Después de una fase inicial de rápida descomposición, el proceso llegó a ser más lento. La descomposición del residuo fue más rápida bajo labranza con disco que bajo SD (Figura 7). Estos resultados son semejantes a los obtenidos en la Pampa Ondulada (Álvarez 1991, Santanatoglia et al. 1989) bajo escenarios mas húmedos que el del presente experimento donde también los residuos enterrados se descomponen mas rápido que en la superficie del suelo. El estudio se realizó con residuos de maíz y trigo. Las constantes de descomposición de ambos componentes del residuo, carbono labil y recalcitrantes (*kL* y *kR*) fueron significativamente más grande cuando los residuos fueron incorporados en el suelo en el tratamiento de la LC que bajo SD. La partición de carbono entre estas dos fuentes fue similar en ambos materiales, la fuente recalcitrante fue el doble a la labil.

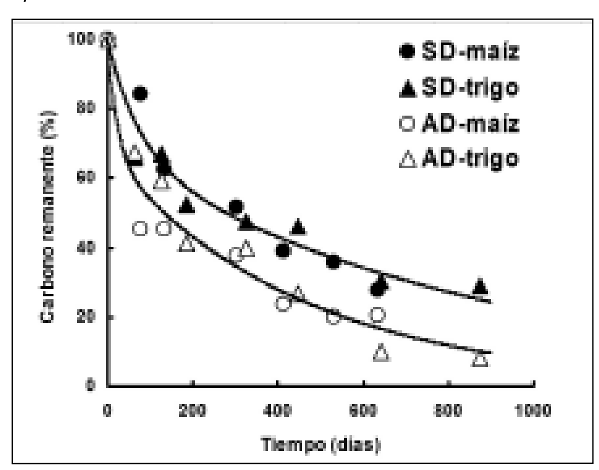


Figura 7. Carbono remanente de residuos de trigo y maíz bajo dos sistemas de labranza, SD= siembra directa, LC= labranza convencional. (Bono y Alvarez 2012).

La dinámica de la descomposición de N de ambos materiales (maíz y trigo) fue similar no existiendo diferencias en las pendientes del modelo de descomposición entre especies por lo que se promedió los resultados para cada sistema de labranza. La descomposición en SD fue más lenta que en LC (Figura 8). Los residuos dejados sobre la superficie del suelo liberaron más lentamente, ajustándose la dinámica de la descomposición al modelo doble exponencial (Ecuación 2, Tabla 3).

Ecuación 2, Nitrógeno

$$N\ remanente = A\ e^{-Bt} + C\ e^{-Dt}$$

Donde:
Nitrógeno remanente = nitrógeno en residuos sin descomponer.
T: tiempo de descomposición.
A = porcentaje de nitrógeno en la fracción labil del residuo.
C = porcentaje de nitrógeno en la fracción resistente del residuo.
B y D = constantes de descomposición de las fracciones labil y resistente respectivamente.

Sistema de labranza	Coeficientes N_L	k_L	N_R	k_R	Coeficiente de determinación
Siembra directa	11,0	0,0612	89,0	0,000464	0,75
Arado de disco	100	0,00144	ns	ns	0,88

Tabla 3. Coeficientes del modelo de descomposición ajustado a la masa de nitrógeno remanente.

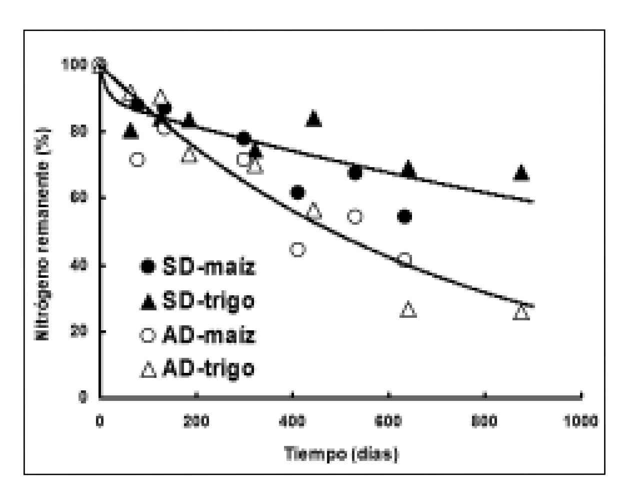


Figura 8. Nitrógeno remanente de residuos de trigo y maíz bajo dos sistemas de labranza, SD= siembra directa, LC= labranza convencional. (Bono y Alvarez 2012).

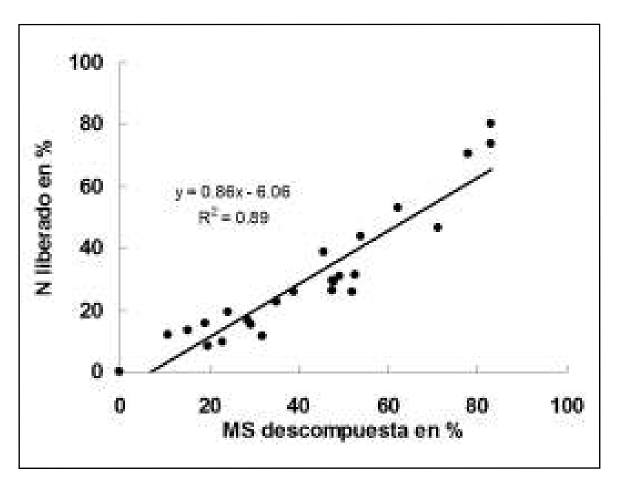


Figura 9. Nitrógeno liberado por la descomposición de los residuos de trigo y maíz en ambos sistema de labranza en función de la magnitud de la descomposición.

Los residuos enterrados se descompusieron mas rápido siguiendo una cinética de primer orden, lográndose en consecuencia un mejor ajuste con un modelo de un solo componente (Tabla 3). Bajo los dos sistemas de labranza fue intensa la liberación de nitrógeno durante el proceso de descomposición, no detectándose inmovilización del nutriente. Durante la descomposición aumentó la concentración de nitrógeno del material. Hubo disminución de la cantidad total de N en el material remanente bajo los dos sistemas de labraza, actuando los materiales como fuentes de N al medio. Se observó una alta relación entre la descomposición y la liberación de N (Figura 9). Para la RSPC la descomposición de residuos implica liberación de N. Por cada 1 % de material descompuesto se libera aproximadamente 1 % del N que contiene.

En síntesis la SD surge como una adecuada tecnología para desarrollar en zonas agroecológicas del tipo de la RSP. Ha habido un gran avance de este sistema de labranza, entre otras causas por la disponibilidad de equipos y herbicidas mejores y más baratos que hacen operaciones de labranza química más limpias.

Balance de Carbono

En la RSP ha sido establecido un balance de carbono para la rotación avena+vicia-maíz-trigo-avena bajo sistemas de labranza diferentes. La respiración del suelo presenta una marcada estacionalidad con un máximo en verano (enero) y un mínimo en invierno (julio). La respiración total del suelo tiene la misma tendencia de variación estacional que en la Pampa Ondulada y, asimismo, la temperatura del suelo es el factor regulador principal de la emisión de C-CO2 (Alvarez et al. 1995a y b). El suelo emitía por descomposición de residuos y mineralización de humus unas 4 t C-CO2 ha^{-1} $año^{-1}$, sin diferencias significativas entre sistemas de labranza, siendo por el contrario muy diferentes los aportes de carbono según se tratara de SD o LC (Figura 10). Bajo SD se determinaron aportes de carbono superiores, atribuidos al efecto de la mayor humedad edáfica sobre la productividad de los cultivos (Bono et al. 2008), lo que determinó balances de carbono contrastantes. Mientras bajo SD el balance de carbono de la rotación fue, para el período de tres años en que se hicieron las mediciones, prácticamente nulo, bajo labranza convencional se perdieron 1.15 t C-CO2 ha^{-1} $año^{-1}$. Esto indica diferencias importantes en la dinámica del carbono del suelo según el sistema de labranza con un impacto positivo de la SD sobre el mismo en relación a sistemas con labranza.

Efectos acumulados del aporte de nutrientes

Al evaluar los efectos acumulados de la aplicación de fertilizantes sobre las propiedades edáficas (Figura 11) se ha comprobado un efecto positivo sobre los contenidos de MO de los primeros 10 cm, tanto en el Haplustol en Pavón (MP) como en el Hapludol en Mari Lauquen (ML). Luego de 6 años de efectos acumulados se infiere que asociado con mayores rendimientos de grano y forraje resultó también mayor el aporte de residuos en los tratamientos con fertilización (Quiroga et al. 2001). Si bien resultan escasos los ensayos de larga duración que estudian los efectos

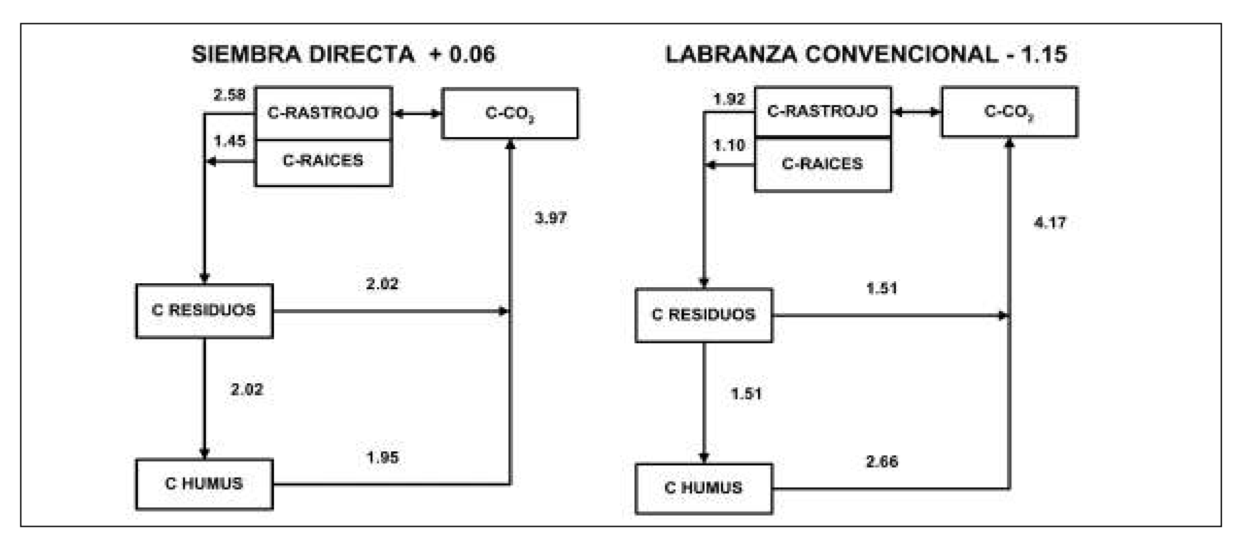


Figura 10. Esquema de la dinámica del carbono en suelos de la Región Semiárida Pampeana bajo la rotación avena+vicia-maíz-trigo-avena. Los números junto a las flechas indican los flujos de carbono (t C ha^{-1} $año^{-1}$). (Bono et al. 2008).

acumulados del aporte de nutrientes en la RSP, los resultados preliminares permiten inferir sobre una contribución positiva sobre MO y algunas propiedades físicas, mientras que las tendencias muestran también efectos sobre el pH.

En los ambientes semiáridos en particular, los cultivos de cobertura (CC) mejorarían la calidad del suelo a través de incrementos en los contenidos de MO. A pesar de su corta estación de crecimiento, restringida por su secado anticipado, este incremento en los contenidos de MO del suelo estaría dado, no sólo por el aporte de residuos de su biomasa aérea, sino también por la contribución de las raíces. Frassier et al. (2012) cuantificaron la biomasa de raíces y el aporte de carbono y N al suelo de distintas combinaciones

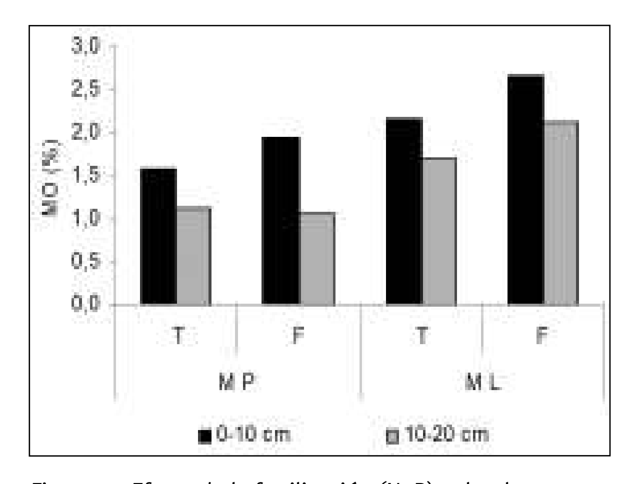


Figura 11. Efecto de la fertilización (N, P) sobre los contenidos de materia orgánica en módulos de larga duración de Mari Lauquen (ML) y Pavón (MP).

de CC a base de centeno y vicia en dos suelos de composición granulométrica contrastante: Haplustol Entico con presencia de tosca y Ustipsamment Típico con influencia de la napa freática. Para cuantificar la biomasa de raíces se utilizaron dos posiciones de muestreo a campo, sobre la línea de siembra y en el entresurco, a dos profundidades de muestreo (0-6 y 6-12 cm). La magnitud del aporte de la biomasa de raíces de los CC varió entre 3000 y 9000 kg ha^{-1}, y en gran parte estuvo estratificado en los primeros 6 cm del perfil del suelo, constituyendo una fuente importante de carbono que podría transformarse rápidamente en MO del suelo. La consociación centeno-vicia aportó la mayor cantidad de biomasa de raíces, carbono orgánico y N total. En ese sentido, la participación de la leguminosa en la consociación, con una concentración de N en sus tejidos superior a la gramínea, aportó importantes cantidades de N al suelo proveniente de sus tejidos radiculares (Figura 12). Sin embargo, el monocultivo de vicia en el suelo arenoso, contribuyó con la menor cantidad de N en su biomasa radicular.

La distribución horizontal y vertical de la raíces fue muy diferente entre suelos, observándose mayor exploración tanto en profundidad como en sentido horizontal en el suelo de composición granulométrica más gruesa. Bolinder et al. (1997) registraron magnitudes del aporte de raíces de cereales (avena, trigo y triticale) del 40, 31 y 22,5% de la biomasa total aportada (raíces + biomasa aérea) en los primeros 30 cm del perfil. Ozpinar y Baytekin (2006) observaron valo-

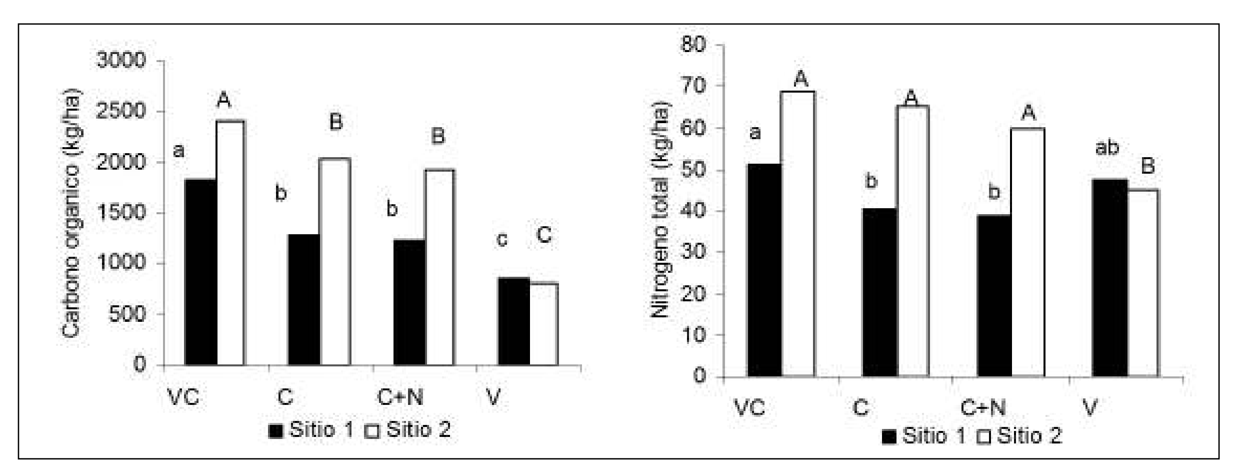


Figura 12. a) Carbono orgánico (kg ha^{-1}) de biomasa de raíces y b) nitrógeno total (kg ha^{-1}) de biomasa de raíces totales de CC en los primeros 12 cm del perfil de suelo, para dos suelo Haplustol Entico (Sitio 1) y Ustipsamment Típico (Sitio 2). VC: consociación vicia-centeno; C: monocultivo de centeno; C+N: centeno + 40N; V: monocultivo de vicia. Las letras minúsculas indican diferencias significativas dentro del sitio 1 y las mayúsculas dentro del sitio 2 (Test Fisher; p<0,05).

res de biomasa de raíces del 40% del total de residuos aportados por Vicia sativa en los primeros 20 cm del perfil. Además, estudios de larga duración realizados por Kätterer et al. (2011) sugieren que las raíces contribuirían más a la MO estable del suelo que los residuos aportados por la biomasa aérea, enfatizando la importancia de evaluar este aporte. La mayor superficie de contacto con la matriz del suelo, rodeada de una rizosfera activa que fue desarrollándose durante el ciclo de crecimiento del cultivo, serian algunos de los factores que favorecieron dicha incorporación. Por otra parte, la calidad de los residuos de raíces aportados por los CC también seria otro aspecto clave para la actividad microbiana del suelo. Al respecto, la incorporación de leguminosas como CC aportaría importantes cantidades de residuos de raíces con una relación C/N menor respecto de los residuos de raíces de gramíneas (Georgieva et al. 2005), favoreciendo aún más la descomposición de los mismos.

La agriculturización del Este de La Pampa, Sur de Córdoba y Este de San Luís, con el consiguiente incremento en el uso de agroquímicos plantea interrogantes acerca de los cambios en propiedades edáficas y la necesidad de evaluar efectos acumulados en distintas condiciones de sitio.

Bibliografía

• Alvarez R. 2005. Balance de carbono en suelos de la Pampa Ondulada. Efecto de la rotación de cultivos y la fertilidad nitrogenada. Simposio "Fertilidad 2005. Nutrición, Producción y Ambiente". pp 61-70. Rosario 27 y 28 de abril de 2005.

• Alvarez R., E. Daniel, O. Santanatoglia, G. M. Brazzola y R. García. 1991. Descomposición de rastrojo de soja en bolsas de residuos con distinto tamaño de poro. Turrialba. 41, 279-284.

• Alvarez R., O. Santanatoglia y R. García. 1995a. Soil respiration, microbial biomass and organic matter contribution of crops in a wheat-soybean rotation. Soil Use and Management 11: 45-50.

• Alvarez R., O. Santanatoglia y R. García. 1995b. In situ decomposition of 14C-labelled wheat as affected by soil disturbance. Agrochimica 39: 343-348.

• Amelung W., K. Flach K. y W. Zech. 1999. Neutral and acidic sugars in particle-size fractions as influenced by climate. Soil Sci. Soc. Am. J. 63:865-873.

• Andriulo A., J. Galantini, C. Pecorari y E. Torioni. 1991. Materia orgánica del suelo en la región Pampeana Argentina. I. Un método de fraccionamiento por tamizado. INTA Pergamino, Inf. Téc. 250: 18pp.

• Beare M., K. Cameron, P. Williams y C. Doscher. 1994. Proceedings of the fiftieth New Zealand Plant Prot. Conf., 520-528 pp.

• Biederbeck V., C. Campbell, V. Rasiah, R. Zentner y G. Wen. 1998. Soil quality attributes as influenced by annual legumes used as green manure. Soil Biol. Biochem., 30:1177-1185.

• Boehm M. y D. Anderson. 1997. A landscape-scale study of soil quality in the three prairie farming systems. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:1147-1159.

• Bolinder M. A, D. A. Angers y J. P. Dubuc. 1997. Estimating shoot to root ratios and annual carbon inputs in soils for cereal crops. Agr. Ecosyst. Environ. 63: 61-66.

• Bono A. y R. Alvarez. 2012. Nitrogen mineralization in a coarse soil of the semi-arid Pampas of Argentina. Archives of

Agronomy and Soil Science
• Bono A, R. Alvarez, D. E. Buschiazzo y R. Cantet. 2008. Tillage Effects on Soil Carbon Balance In A Semiarid Agroecosystem. Soil Sc. Soc. Am. J. 72:1140-1149.
• Bravo O., M. Blanco y N. Amiotti. 2004. Atributos que definen la segregación de taxas en la transición semiárida-árida Argentina. XIX Congr. Argentino Ciencia del Suelo, Paraná.
• Buschiazzo D. E., J. L. Panigatti y P. W. Unger. 1998. Tillage effects on soil properties and crop production in the subhumid and semiarid Argentinean Pampas. Soil and Tillage Res. 49: 105-116.
• Buschiazzo D. E., G. G. Hevia, E. N. Hepper, A. Urioste, A. Bono A. y F. J. Babinec. 2001. Organic C, N and P in size fractions of virgin and cultivated soils of the semi-arid pampa of Argentina. Journal of Arid Environments. En Prensa.
• Cambardella C. y E. Elliott. 1993. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 57:1071-1076.
• Cambardella C. y E. Elliott. 1994. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 58:123-130.
• Campbell C., V. Biederbeck, B. McConkey, D. Curtin y R. Zentner. 1999. Soil quality-Effect of tillage and fallow frecuency. Soil Biol. Biochem. 31:1-7.
• Carter M., E. Gregorich, D. Angers, R. Donald, y M. Bolinder. 1998. Organic C and N storage, and organic C fractions, in adjacent cultivated and forested soils of eastern Canada. Soil Till. Res. 47: 253-261.
• Casanovas E., H. Echeverria y G. Studdert. 1995. Materia orgánica del suelo bajo rotaciones de cultivos. Contenido total y de distintas fracciones. Ciencia del Suelo 13:16-20.
• Dalal F. y Meyer. 1986. Long-term trends in fertility of soil under continuos cultivation and cereal cropping in southern Queesland. I. Overall changes in soil properties and trends in winter cereal yields. Aust. J. Soil Res. 24:265-279.
• Davidson J., F. Gray y D. Pinson. 1967. Changes in organic matter and bulk density with depth under two cropping systems. Agron. J. 59:375-378.
• Díaz-Zorita M., D: E. Buschiazzo y N. Peinemann. 1999. Soil organic matter and wheat productivity in the Semiarid Argentine Pampas. Agon. J. 91:276-279.
• Douglas C. L. Jr. y R. W. Rickman. 1992. Estimating crop residue decomposition from air temperature, initial nitrogen content, and residue placement. Soil Sci. Soc. Am. J. 56:272-278.
• Fabrizzi P., A. Morón y F. García. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded Mollisols in Argentina. Soil Sci. Soc. Am. J. 67:1831-1841.
• Funaro D., R. Fernández y A. Quiroga. 2004. Aspectos edáficos relacionados con el manejo del agua y la nutrición del maíz. In: Producción de Maíz en Sistemas Mixtos, INTA Anguíl, Bol. 81:18-30.
• Franzluebbers A. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. Soil Till. Res. 66:95-106.
• Frasier, I; D. Riestra, E. Noellemeyer y A. Quiroga. 2012. Aporte de C y N de raíces de cultivos de cobertura. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
• Georgieva, S; S Christensen; H Petersen; P Gjelstrup y K Thorup-Gregorich E., M. Carter, D. Angers, C. Monreal y B. Ellert. 1994. Towars a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. Can. J. Soil Sci. 74:367-385.
• Guerif J. y A. Faure. 1979. Role de la matiere organique sur le comportement des sols au compactage. I-Etude statistique. Ann. Agron., 30: 469-480.
• Hassink J., L. Bouwman, K. Zwart, J. Bloem y L. Brussard. 1993. Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and C and N mineralization in grassland soils. Geoderma 57: 105-128.
• Hevia G., D. E. Buschiazzo, E. Hepper, A. Urioste y E. Antón. 2003. Organic matter in size fractions of soils of the semiarid Argentina. Effects of climate, soil texture and management. Geoderma 116: 265-277
• Janzen H. H., C. A. Campbell, R. C. Izaurralde, B. H. Ellert, N. Juma, W. B. McGill y R. P. Zentner. 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies.
• Kapkiyai J., N. Karanja, J. Qureshi, P. Smithson y P. Woomer. 1999. Soil organic matter and nutrient dynamics in a Kenian nitisol under long-term fertilizer and organic input management. Soil Biol. Biochem. 31:1773-1782.
• Kätterer T., M. A. Bolinder, O. Andrén, H. Korchmann y L. Menichetti. 2011. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. Agr. Ecosyst. Environ. 141: 184-192.
• Kirschbaum M. U. F. 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition and the effect of global warming on soil organic storage. Soil Biol. Biochem. 27:753-760.
• Klingebiel A. y P. Montgomery. 1961. Land capability classification. Agric. Handb. Nº 210 (SCS-USDA):21pp.
• Kristensen. 2005. Early decomposer assemblages of soil organisms in litterbags with vetch and rye roots. Soil Biol. & Biochem. 37: 1145–1155.
• Lampurlanes J., P. Angás y C. Cantero-Martínez. 2002. Tillage effects on water storage during fallow, and on barley root growth and yield in two contrasting soils of the semiarid Segarra region Spain. Soil Till. Res. 65:207-220.
• Mc Aneney K. y J. Arrúe. 1993. A wheat-fallow rotation in northeastern Spain: water balance-yield considerations. Agronomie 13:481-490.

• Ozpinar, S y H. Baytekin. 2006. Effects of tillage on biomass, roots, N-accumulation of vetch (Vicia sativa L.) on a clay loam soil in semi-arid conditions. Field Crops Res. 96: 235-242.
• Parr J. y R. Papendick. 1997. Soil quality: Relationships and strategies for sustainable dryland farming systems. Ann. Arid Zone 36:181-191.
• Paustian K. y H. P. Collins, EA Paul. 1997. Management controls on soil carbon. P 15-49. In: EA Paul et al. (ed) Soil organic matter in temperature agroecosystem. CRC Press. Boca Raton. FL.
• Pieri C. 1995. Long-term soil management experiments in semiarid Francophone Africa. Adv. Soil Sci., 225-264pp.
• Puricelli C., M. Puricelli y H. Kruger. 1997. Profundidad útil del suelo y rendimiento del trigo. INTA Bordenave, Bol. Téc. 14:14pp.
• Quiroga A. 2002. Indicadores de calidad de suelos en molisoles de la región semiárida pampeana. Relación con el manejo y productividad de cultivos. Tesis Doctor en Agronomía. Universidad Nacional del Sur.
• Quiroga A., D. E. Buschiazzo y N. Peinemann. 1996. Soil organic mater particle size fractions in soils of semiarid Argentinean Pampas. Soil Sci. 161: 104-108.
• Quiroga A. R., D. E. Buschiazzo y N. Peinemann. 1998. Management discriminat properties in semiarid soils. Soil Sci. 163:591-597.
• Quiroga A., Buschiazzo D. y N. Peinemann. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. Soil Till. Res. 52:21-28.
• Quiroga A., D. Funaro y R. Fernández. 2005. Factores edáficos y de manejo que condicionan la eficiencia del barbecho en la Región Pampeana. Ciencia del Suelo. 23: 79-86.
• Quiroga A., O. Ormeño y N. Peinemann. 2001. Contenidos de materia orgánica y respuesta de trigo a la fertilización. V congreso Nacional de trigo, Córdoba.
• Quiroga A., M. Sack, R. Fernández, H. Otamendi y D. Funaro. 2007. Efectos directos y residuales de la fertilización sobre la productividad y propiedades de un Haplustol Entico. EEA INTA Anguil, Publ. Téc. 89:35-54pp.
• Reeves D. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. Soil Till. Res. 43:131-167.
• Riquier J., D. Bramao y J. Cornet. 1970. A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity. FAO Soil Res., 38pp.
• Santanatoglia O. J., R. Alvarez., P. E. Daniel, G. M. Brazzola y R. Garcia. 1989. Descomposición de rastrojo de trigo, respiración y biomasa microbiana bajo labranza convencional y siembra directa. Anales de Edafología y Agrobiología 787-798.
• Schimel D., M. Stillwell y R. Woodmansee. 1985. Biochemistry of C, N, and P in a soil catena of the shortgrass steppe. Ecology 66:276-282.
• Steiner J. L., H. H. Schomberg, Jr. C. L. Douglas y A. L. Black. 1994. Standing stem persistence in no-tillage small-grain fields. Agron. J. 86:76-81.
• Stott D. E., H. F. Stroo, L. F. Elliott, R. I. Papendick y P. W. Unger. 1990. Wheat residue loss from fields under no-till management. Soil Sci. Soc. Am. J. 54:92-98.
• Sys C. y R. Frankart. 1971. Land capability classification in the humid tropics. African Soils. Vol. XVI, Nº 3:173-175.
• Thomas G., M. Sorokina y D. Scott Adams. 1997. Siembra directa y la calidad del suelo. V Congr. Nac. AAPRESID, Mar del Plata, 201-229pp.
• Tukey J. W. 1949. One degree of freedom for non-additivity. Biometrics, 5:232-242.
• Unger P., H. Schomberg, T. Dao y O. Jones. 1997. Tillage and crop residue management practices for sustainable dryland farming systems. Annals of Arid Zone 36:209-232.
• Wang X. y Z. Gong. 1998. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China. Geoderma 81:339-355.

Alberto Quiroga, Romina Fernández, Pamela Azcarate, Alfredo Bono y Carolina Gaggioli

Agua del suelo. Bases funcionales para su manejo

En la mayor parte del área productiva de Argentina se comprueba que las precipitaciones durante el ciclo de los cultivos no cubren los requerimientos de uso consuntivo de los mismos. En estas condiciones, capacidad de retención de agua (CRA) y los contenidos agua útil (AU) a la siembra poseen una significativa influencia en la productividad. Esta disponibilidad de agua resulta dependiente de aspectos genéticos de los suelos determinantes de la CRA (Textura, espesor), del cultivo (ciclo, índice de cosecha, profundidad efectiva de raíces: PER) y del manejo (sistema de labranza, cultivo antecesor, barbecho, cobertura). El régimen hídrico también puede ser influenciado por la presencia de la napa freática (profundidad, ascenso capilar, contenido de nutrientes) y por factores que condicionan la captación (infiltración, conductividad hidráulica), almacenaje y eficiencia de uso del agua. Al respecto, es necesario considerar ciertas características del sistema poroso, asociado con distintas funciones en el suelo que pueden condicionar las relaciones hídricas entre suelo, planta y atmósfera. Si bien todos los factores mencionados pueden ejercer algún grado de influencia sobre la producción de granos, el peso relativo de los mismos normalmente varía entre sitios con distintas características edafoclimáticas. Identificar los factores más importantes (a nivel de sitio) y establecer cierto orden jerárquico en los mismos resulta imprescindible para sentar las bases del manejo del agua y optimizar la producción (interacción genotipo-ambiente).

A fin de ilustrar sobre los aspectos mencionados, en este Capitulo dedicado al agua del suelo, se presentan a continuación resultados de estudios conducidos en la Región Semiárida Pampeana (RSP) y una breve caracterización de parámetros estructurales influenciados por el manejo y relacionados con dinámica del sistema poroso. Distintos estudios han abordado los problemas en la captación del agua (infiltración, conductividad hidráulica, escurrimientos) a partir de la reducción de la macroporosidad como consecuencia de la degradación física de los suelos. Parámetros edáficos indicadores de compactación han sido incorporados en los estudios de las relaciones agua-suelo-planta. Entre los principales, densidad aparente máxima, compactación relativa, susceptibilidad a la compactación, niveles críticos de humedad, resistencia a la penetración, conductividad hidráulica y cuantificación de la macroporosidad a partir de mesas de tensión.

Caracterización del sistema poroso

El sistema poroso del suelo impacta directamente sobre el balance de agua (entradas y salidas del sistema), en el funcionamiento hídrico (relaciones agua- planta), en la entrada y difusión de gases y de calor, y en el desarrollo y crecimiento de las raíces (Gil 2007). Existen distintas clasificaciones que responden a otro tanto de criterios y aplicaciones (Ingeniería agronómica, civil, hidrología). En la Tabla 1 se muestran criterios agronómicos adaptados de la

pF	Tensión (KPa)	Clasificación	Diam. Poros (μm)	Función
0	0.1	Macroporos	3000-900	Drenaje instantáneo
1	1	Macroporos	900-300	Drenaje rápido
2	10	Macroporos	90-30	Drenaje medio
2.5	33	Mesoporos	30-9	Drenaje lento
2.5-4.2	33-1500	Mesoporos	10-0.2	Agua útil
≥ 4.2	≥ 1500	Microporos	≤ 0.2	Agua no disponible

Tabla 1. Clasificación de poros según criterios agronómicos y físicos.

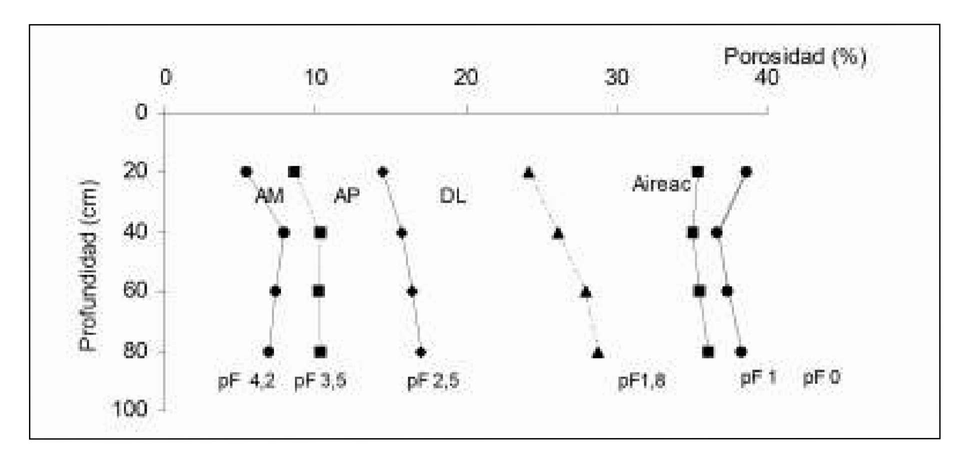


Figura 1. Distribución de poros de distinto diámetro a través del perfil de un suelo franco arenoso.

clasificación propuesta por De Boodt y De Leenheer (1967).

En la Figura 1 se ha representado la variación a través del perfil de la proporción de poros de distintos diámetros de un suelo Haplustol Entico franco arenoso próximo a la localidad de Dorila. Entre los perfiles hídricos de pF 2,5 (capacidad de campo (CC)) y 4,2 (punto de marchitamiento (PMP)) se encuentra contenida el agua biodisponible. A pF menores de 2,5 el agua se encuentra contenida en macroporos, poros donde tiene lugar el drenaje y el intercambio gaseoso.

La relación entre la capacidad de almacenaje y el movimiento del agua en los suelos, con la porosidad es evidente y fundamental, en la medida que algunas funciones resultan muy sensibles a la influencia del manejo. Sin embargo no es solamente la cantidad total de poros lo que define el comportamiento hídrico del suelo, sino también y en muchos casos de manera predominante, las características específicas del sistema poral, en términos de forma, tamaño, distribución, orientación, interconexión y estabilidad. Por lo expuesto, la porosidad total normalmente no resulta un indicador adecuado para explicar distintos aspectos de la dinámica hídrica, intercambio gaseoso, desarrollo de las raíces. En regiones semiáridas existe especial preocupación por las restricciones que el sistema poroso ejerce en la captación del agua pluvial, condicionando con bastante frecuencia una baja eficiencia de uso. La eficiencia en los procesos de ingreso del agua al suelo (infiltración) y movimiento entre los horizontes del perfil (conductividad hidráulica) es fuertemente condicionada por el manejo, en mayor grado en Molisoles que en Entisoles de la RSP.

Agua en el suelo

La infiltración o cantidad de agua que ingresa al suelo a través de su superficie, es una función creciente del tiempo, mientras que la velocidad de infiltración es una función variable y decreciente. La

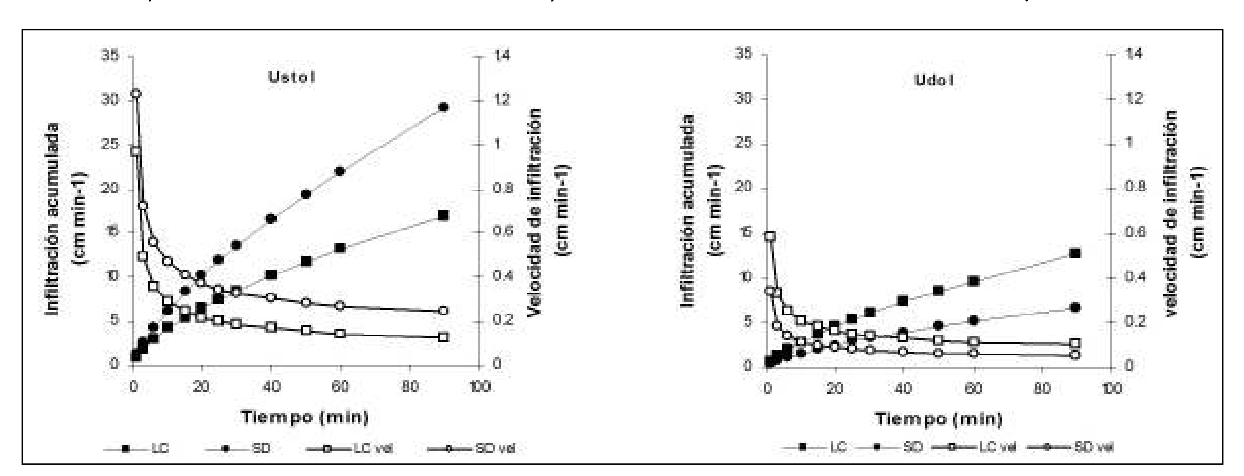


Figura 2. Infiltración acumulada (cm min^{-1}) y velocidad de infiltración (cm min^{-1}) para las distintas labranzas sobre un Ustol (a) y un Udol (b).

velocidad de infiltración es la relación entre el volumen infiltrado o lámina y el tiempo transcurrido. Su representación gráfica es una curva cóncava, decreciente en el tiempo y asintótica del eje que lo representa. La velocidad de infiltración decrece en el tiempo rápidamente, siendo elevada al comenzar el proceso. Eso se debe a que en el fenómeno participan otras fuerzas además de la gravitatoria, como por ejemplo las tensiones capilares. En una primera etapa tiene lugar el almacenaje de agua y colmada esta capacidad, el horizonte en cuestión actúa como una capa de conducción, transfiriendo a horizontes inferiores el agua que ingreso al mismo. Cuando la velocidad e infiltración se estabiliza en el tramo asintótico de la curva, la velocidad de infiltración se aproxima a la conductividad hidráulica. En la agricultura de regadío es necesario definir en cada situación parámetros como infiltración promedio, infiltración básica, infiltración acumulada en un determinado tiempo a partir de la cual calcular los tiempos de riego. Para la zona de riego gravitacional de Colonia 25 de Mayo se cuenta con esta información, la cual normalmente es obtenida con ensayos de campo o bien estimada a partir de la composición granulométrica de los suelos.

Álvarez (2007) evaluó el efecto de las labranzas sobre la infiltración en suelos de similar granulometría (franco arenoso) pero diferenciados por el régimen hídrico (Ustol y Udol). La Figura 2 muestra que la infiltración acumulada y velocidad de infiltración resultaron mayores en el Ustol, coincidiendo con la mayor porosidad total y proporción de macroporos de este suelo. En el mismo se comprobó mayor infiltración bajo siembra directa (SD), coincidiendo con resultados obtenidos sobre Haplustoles por Quiroga y Monsalvo (1989). Distinto comportamiento se registró en el Udol donde la infiltración resultó mayor bajo labranza convencional (LC), lo cual podría estar relacionado con la menor proporción de macroporos que presento este suelo. Respecto al valor "m" de la pendiente de infiltración acumulada ($I=k\ t^m$) se comprobó que la misma fue mayor en SD y en el Udol (SD=0.88 y LC= 0.66), diferencias que coincidieron con las observadas al evaluar la estabilidad estructural en húmedo. Quiroga y Monsalvo (1989) indican que este parámetro, la pendiente "m", constituye un importante indicador de estabilidad estructural en Molisoles de la RSP.

Parte del agua que ingresa al perfil es retenida en los capilares del suelo menores a 10 um de diámetro y parte drena a mayor profundidad. En la Figura 3 se han representado las relaciones tensión (pF) y humedad (%) para dos suelos de texturas representativas de la RSP.

La tensión es una medida de la tenacidad con que es retenida el agua por el suelo, es una presión negativa que involucra las fuerzas de gravedad, hidrostática y capilares, con excepción de las fuerzas osmóticas. Se mide como una fuerza por unidad de área, que debe aplicarse para extraer el agua.

El contenido de humedad en % que tiene el suelo después de la eliminación del agua gravitacional se denomina CC. La capacidad de campo no puede ser determinada con precisión debido a que no existe en el tiempo discontinuidad en la curva de humedad. No obstante, las determinaciones de este parámetro en laboratorio se realizan a tensiones de 0,3 atm (pF = 2,5; 33 KPa). De la misma manera se determina el coeficiente de marchitamiento o PMP a tensiones de 15 atm (pF = 4,2; 1500 KPa), el cual constituye el limite inferior del AU en el suelo. Las plantas tienen una capacidad de succión límite

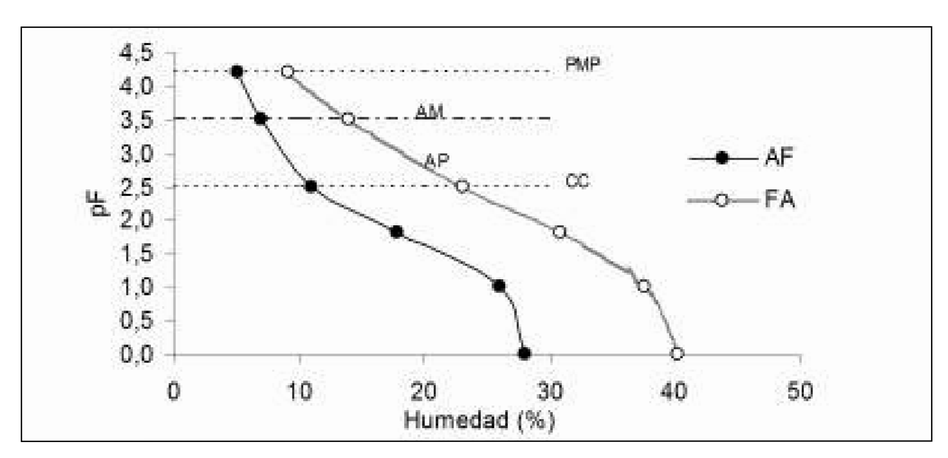


Figura 3. Relaciones tensión-humedad en suelos de texturas arenoso franco (AF) y franco arenoso (FA). Adaptado de Fernández (2007).

variable según las especies. El punto de marchitamiento corresponde al estado particular en el que el agua es retenida por el suelo con fuerzas superiores a las fuerzas de succión de las raíces.

Estas relaciones tensión-humedad pueden variar en función de que el suelo se esté humedeciendo o secando y se conoce este fenómeno como "histéresis". Es decir que dado un contenido de agua en el suelo, las tensiones varían según se haya llegado a ese punto por incremento de la humedad en el suelo o por desecación del mismo (Figura 4).

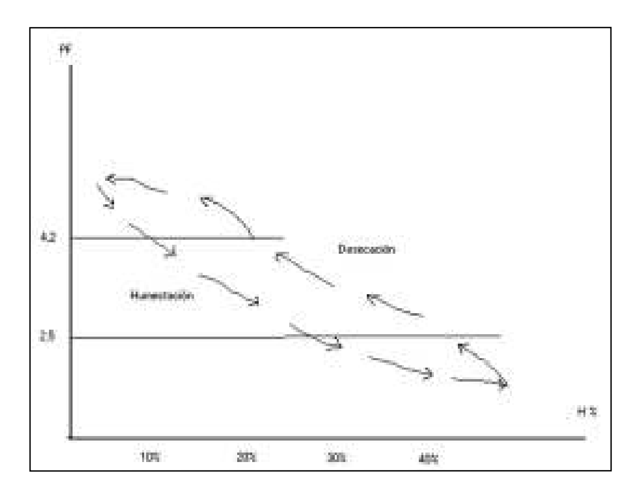


Figura 4. Curva de histéresis que muestra la relación tensión humedad de un suelo por la vía de la humectación o desecamiento.

Perfiles hídricos

Los perfiles hídricos muestran la variación de los contenidos totales de humedad en el espesor de suelo definido como sección control, el cual normalmente se establece en función de la profundidad efectiva de las raíces. Cuando el contenido de agua total se relaciona con los perfiles hídricos de PMP y CC queda representada el AU y la necesidad de recarga del perfil. En la región de la planicie medanosa del Este de La Pampa es frecuente que a profundidades de 100 a 180 cm los contenidos de agua superen el valor de CC, situación que tiene lugar por influencia de la napa de agua. A continuación y con el propósito de integrar los conceptos desarrollados se presentan resultados de estudios realizados en la RSP. En las Tablas 2 y 3 se muestra la capacidad de almacenaje de AU para un perfil de suelo representativo de la Planicie con Tosca (E. Martíni), comparativamente de granulometrías más finas que un suelo de la Planicie Medanosa (M. Riglos).

En la Figura 5 se muestran resultados de un módulo de experimentación de larga duración, que acumula efectos de las labranzas y la ganadería sobre propiedades de un Haplustol Entico franco arenoso, localizado en Dorila. Se han representado los perfiles hídricos correspondiente a PMP, a SD con (SDCP) y sin (SDSP) pastoreo y a LC también con y sin pastoreo (LCCP, LCSP). Se comprueba influencia positiva de la SD sobre los contenidos de AU en los primeros 40 cm del perfil, con alguna ventaja cuando no se utilizan los rastrojos con la ganadería y una mayor cobertura queda sobre la superficie del suelo.

Prof.	DA	CC		PMP		Agua Útil
		% Hum	mm	% Hum	mm	Mm
0-20	1.19	16.46	39.17	7.64	18.18	20.99
20-40	1.30	16.30	42.38	7.84	20.38	22.00
40-60	1.21	16.90	40.49	7.85	19.00	21.90
60-80	1.23	16.47	40.52	6.77	16.65	23.86
80-100	1.23	16.47	40.52	6.77	16.65	23.86
Tosca						
0-100			203.49		90.87	112.61

Tabla 2. Capacidad de almacenaje de agua útil (mm) en un suelo franco arenoso de Embajador Martíni: Haplustol Entico de la planicie con tosca.

Prof.	DA	CC		PMP		Agua Útil
		% Hum	mm	% Hum	mm	Mm
0-20	1.22	7.54	18.40	4.12	10.04	8.36
20-40	1.27	5.47	13.89	3.90	9.91	3.99
40-60	1.20	6.45	15.47	2.22	5.33	10.14
60-80	1.22	4.74	11.57	2.61	6.38	5.19
80-100	1.22	5.90	14.39	2.86	6.97	7.42
100-120	1.22	5.36	13.09	2.96	7.22	5.86
120-140	1.22	4.86	11.87	2.87	7.01	4.86
0-140			96.68		52.86	45.82

Tabla 3. Capacidad de almacenaje de agua útil (mm) en un suelo arenoso franco de Miguel Riglos: Ustipsamente Típico de la planicie medanosa.

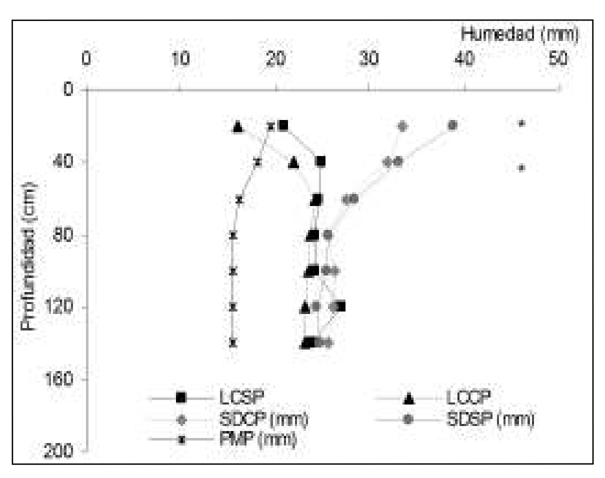


Figura 5. Contenidos de agua en el perfil de un suelo franco arenoso influenciado por el sistema de labranza y la ganadería.

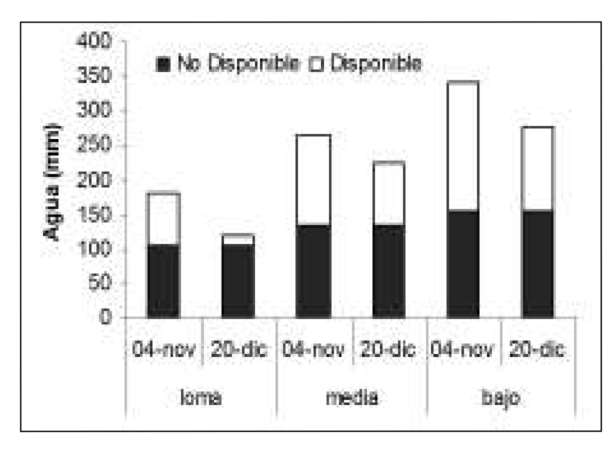


Figura 6. Influencia del relieve sobre los contenidos de agua útil en dos momentos del ciclo de maíz.

Otro aspecto a considerar es la influencia del relieve, como factor formador de suelos, sobre propiedades edáficas estrechamente relacionadas con la productividad de los cultivos. Tanto en cultivos destinados a la producción de grano como de forraje se comprueban diferencias significativas en rendimientos y/persistencia entre lomas, medias lomas y bajos de un mismo potrero. Con el objetivo de desarrollar tecnología sitio-especifico, en apoyo de la agricultura de precisión, se han conducido ensayos con distintos híbridos, densidades de siembra y niveles de nutrición en maíz, girasol y trigo. La Figura 6 tiene como propósito mostrar como varía la disponibilidad de agua durante el cultivo de maíz en distintos ambientes de un mismo potrero.

En base a lo expuesto es necesario considerar en la estrategia de producción y de manejo del agua los requerimientos hídricos de la secuencia de cultivos, la capacidad de los suelos de almacenar agua durante los barbechos, las probabilidades de precipitaciones a través de cada uno de los ciclos, el espesor de suelo que exploran los cultivos, el cual resulta variable entre especies, cultivares y fechas de siembra.

Probabilidad de precipitaciones, usos consuntivos y rendimientos

El girasol es uno de los principales cultivos de la RSP. Para alcanzar adecuados rendimientos (2000 a 3500 kg ha^{-1}) posee requerimientos de agua variables entre 420 a 450 mm. La probabilidad de que en Anguil, durante octubre-febrero, las precipitaciones cubran este requerimiento es inferior al 30% (Figura 7a). Para satisfacer los requerimientos con una probabilidad del 70% el contenido de agua útil en el suelo (a la siembra) deberá ser superior a 150 mm. En la medida que esto no suceda los rendimientos estarán significativamente condicionados por la

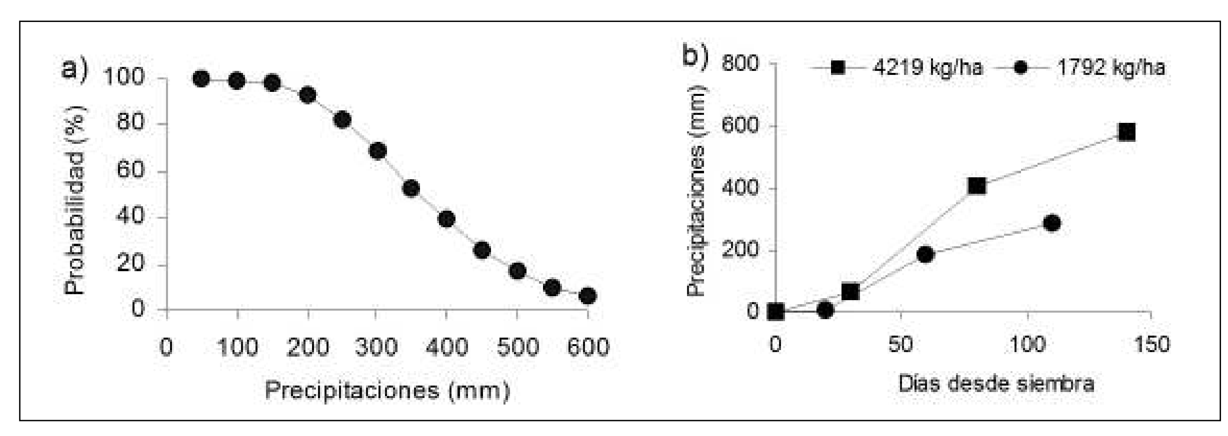


Figura 7. a) Probabilidad de ocurrencia de precipitaciones de octubre a febrero, (Anguil, 1921-2005). b) Usos consuntivos, ciclo y rendimiento para un híbrido de girasol con y sin limitaciones hídricas.

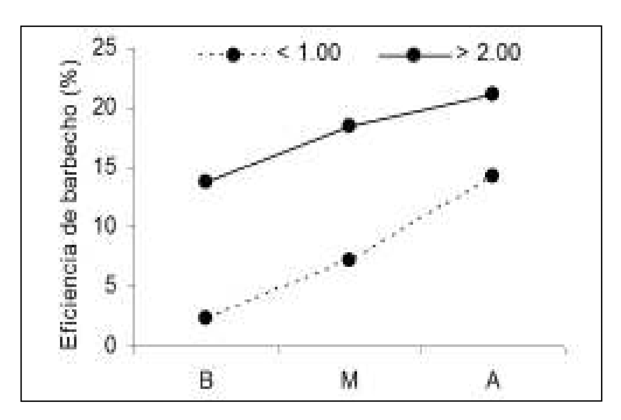


Figura 8. Eficiencia de barbecho en sitios con profundidad menor a 1 m y mayor a 2 m, con bajo (B), medio (M) y alto (A) nivel de residuos. Adaptado de Fernández (2007).

variación (entre lotes) de los contenidos iniciales de agua (Figuras 7 a y b).

Similares resultados se comprobaron en trigo, donde la variación del rendimiento se relacionó con el agua almacenada a la siembra y esta con la cantidad de residuos en superficie durante el barbecho (r=0,85). Los resultados mostraron además que la eficiencia del barbecho resultó dependiente del nivel de cobertura (Figura 8) comprobándose un valor crítico de aproximadamente 2000 kg ha^{-1} de materia seca (60% de cobertura). Sin embargo, el espesor de suelos y/o PER condicionó la eficiencia de los barbechos y los efectos de la cobertura (Fernández 2007). Fontana et al. (2006) comprobaron además que el rendimiento de trigo, para un mismo nivel de cobertura, varió no solo en función del espesor de suelo sino también de la textura (Figura 9). Determinaron que en perfiles del mismo espesor y cobertura el rendimiento de trigo fue mayor en aquellos de granulometrías más finas.

Al considerar conjuntamente precipitaciones, uso consuntivo y la CRA de 85 lotes destinados a girasol se comprobó que el 60% de los sitios presentó limitantes edáficas (genéticas) que condicionarían el ren-

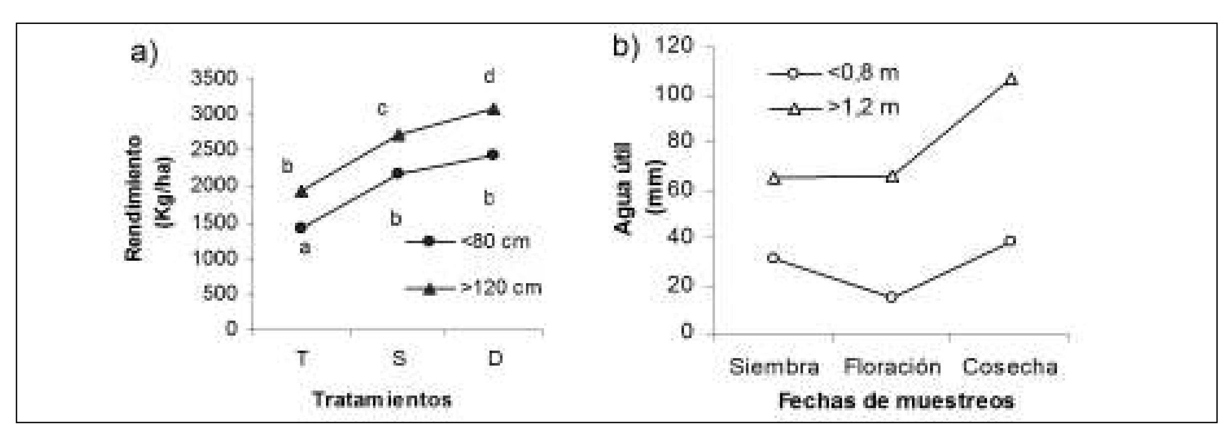


Figura 9. a) Respuesta de trigo a la fertilización nitrogenada y b) Contenidos de agua útil en suelos con distintas profundidad efectiva T: testigo, S: 40 kg N ha^{-1}, D: 80 kg N ha^{-1}. Adaptado de Fontana et al. (2006).

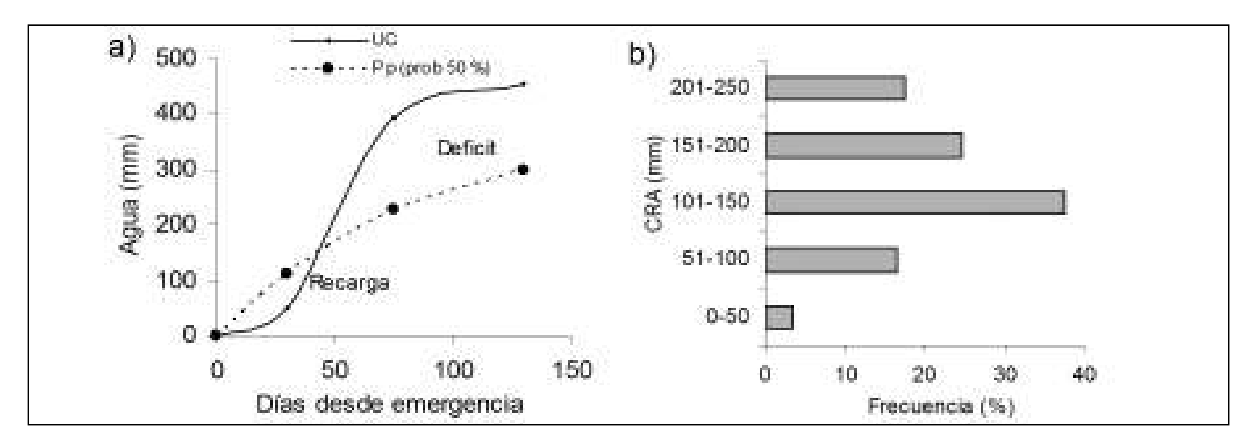
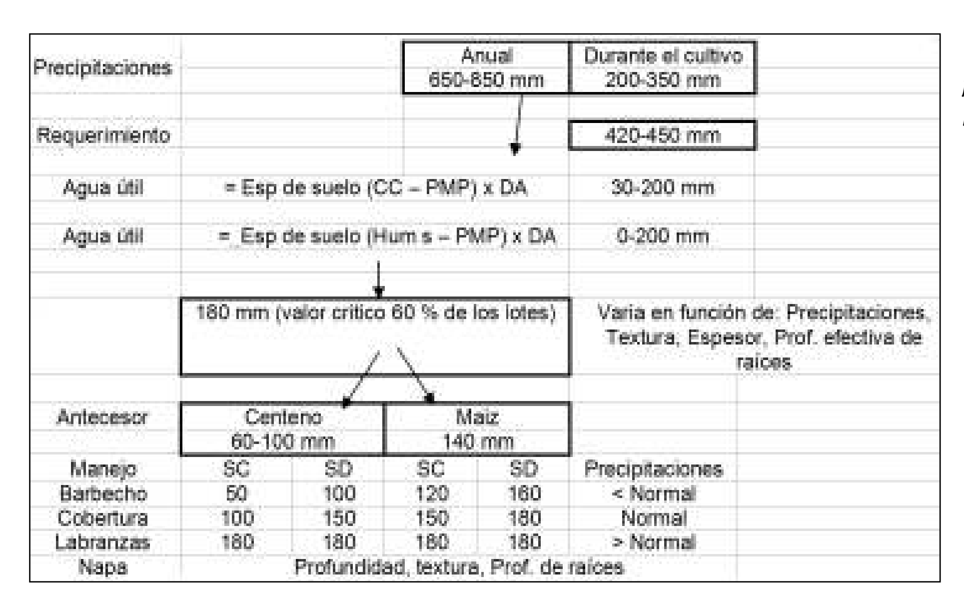


Figura 10. a) Uso consuntivo y precipitaciones acumuladas durante el ciclo del cultivo de girasol con una probabilidad del 50 %, b) Frecuencia de la capacidad de retención de agua útil de los 85 lotes evaluados previo a la siembra del girasol. Adaptado de Funaro (2007).



Precipitaciones			Anual 650-850 mm	Durante el cultivo 200-350 mm	
Requerimiento				420-450 mm	
Agua útil	= Esp de suelo (CC – PMP) x DA			30-200 mm	
Agua útil	= Esp de suelo (Hum s – PMP) x DA			0-200 mm	
	180 mm (valor crítico 60 % de los lotes)			Varía en función de: Precipitaciones, Textura, Espesor, Prof. efectiva de raíces	
Antecesor	Centeno 60-100 mm		Maíz 140 mm		
Manejo	SC	SD	SC	SD	Precipitaciones
Barbecho	50	100	120	160	< Normal
Cobertura	100	150	150	180	Normal
Labranzas	180	180	180	180	> Normal
Napa	Profundidad, textura, Prof. de raíces				

Tabla 4. Efecto de distintos factores sobre la disponibilidad de agua.

dimiento (Figura 10). Además, en el 40% restante de los sitios, con adecuada CRA (mayor 150 mm), el manejo previo también condicionó una menor disponibilidad de agua a la considerada crítica (150 mm). El siguiente esquema resume el efecto conjunto de distintos factores sobre la disponibilidad de agua del suelo (Tabla 4).

En la actualidad los estudios sobre el manejo del agua para la producción de granos están orientados a identificar y establecer un orden jerárquico de los factores que en diferentes condiciones de sitio condicionan la eficiencia de uso del agua pluvial. A manera de ejemplo se concluye este punto haciendo referencia a estudios de Álvarez et al. (2006), los cuales evaluaron el efecto del sistema de labranza sobre el rendimiento de maíz en Molisoles de similar textura diferenciados por el régimen de humedad (Ustol y Udol). Las diferencias de rendimiento fueron significativas y mayores entre suelos que entre sistemas de labranza. A pesar de presentar similar número de granos/m^2, la mayor disponibilidad de agua del Udol durante la etapa de llenado dio lugar a granos de mayor peso y consecuentemente mayor rendimiento. Estos resultados obtenidos en suelos de similar textura y manejo (sistema de labranza, genética de maíz y fertilización) muestran la significativa influencia que poseen las variaciones de las precipitaciones en la región.

Consideraciones sobre la estructura

Distintos factores (climáticos, edáficos y de manejo) pueden condicionar de manera significativa la eficiencia de uso del agua al incidir en las fases de captación, almacenaje y uso. En la medida que se expande la frontera agrícola hacia regiones con mayores limitaciones climáticas y edáficas, la evaluación y el manejo de aspectos físicos de los suelos se torna relevante por su influencia sobre los rendimientos. En suelos como los de la RSP, con bajos contenidos de arcilla y medios a bajos de MO, distintos parámetros vinculados a la estructura y al sistema poroso adquieren especial relevancia.

Los efectos del manejo sobre la estructura de los suelos y el secuestro de carbono resultan dependientes de la condición de sitio y varían con la cantidad, tipo y calidad de los residuos; características de los suelos, presencia y actividad de microorganismos, sistemas de labranza y características climáticas (Blanco-Canqui y Lal 2007). Al considerar un sitio en particular, estos autores comprobaron que los efectos del aporte de residuos sobre la proporción de macroagregados (>5mm) resultaron dependientes de los cambios en los contenidos de MO. Sin embargo, se ha comprobado que variaciones en la granulometría (condición de sitio) tendrían un mayor efecto sobre algunas características de la estructura que cambios en los contenidos de MO, dificultando en estos casos la extrapolación de resultados que resultarían sitio dependiente. Al respecto, Campbell y Souster (1982) al comparar suelos vírgenes y agrícolas comprobaron importantes pérdidas de MO (41-53%) con un efecto diferencial de la textura y mayores pérdidas en suelos de granulometrías más gruesas. También en Molisoles de la RSP, al evaluar los contenidos de MO, comprobaron inter-

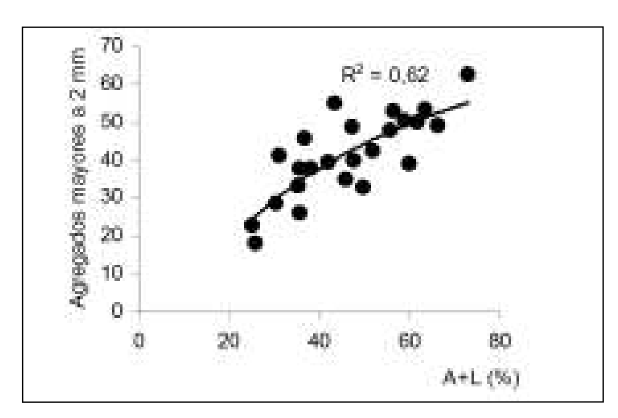


Figura 11. Proporción de agregados >2mm en función de los contenidos de arcilla + limo (A+L).

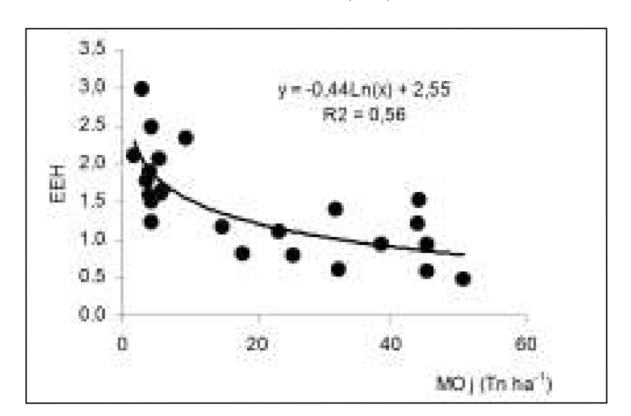


Figura 12. Variación de la estabilidad de agregados en húmedo en función de los contenidos de MOj en agregados de 2 a 8mm.

acción significativa entre suelos (granulometría) y manejo. Analizando los resultados mediante la prueba de aditividad de Tukey (1949), se concluye que los efectos de distintos manejos no pueden generalizarse en la medida que no se consideren suelos de similar granulometría. Coincidentemente, Pieri (1995) comprobó que en suelos de África los niveles críticos de MO resultaron dependientes de los contenidos de arcilla + limo. A fin de minimizar los efectos de variaciones en la granulometría distintos autores han considerado más adecuado el uso de índices, como MO/arcilla+limo (Pieri 1995; Quiroga et al. 2006), MO/arcilla (Ferraris et al. 2002), densidad aparente/textura (Daddow y Warrington 1983) o el índice de estratificación de la MO (Franzluebbers 2002).

Al evaluar los efectos del manejo sobre la estructura también resulta importante considerar los cambios cualitativos, atendiendo al diferente grado de influencia que distintas fracciones orgánicas poseen sobre las propiedades físicas de los suelos. En relación con la estabilidad de los agregados, Tisdall y Oades (1982) diferenciaron los agentes orgánicos de unión en transitorios (principalmente polisacáridos), temporarios (raíces e hifas de hongos) y persistentes (componentes aromáticos). Mientras la fracción orgánica temporaria confiere estabilidad a los macroagregados y por lo tanto puede ser controlada por el manejo, la estabilidad de los microagregados es controlada por la MO persistente ligada a las fracciones minerales más finas y en consecuencia es poco influenciada por el manejo. Al respecto resultan de interés los estudios realizados por Boix-Fayos et al. (2001) quienes al evaluar suelos del sur de España a través de una climosecuencia comprobaron que la estabilidad de los microagregados mostró correlación positiva con los contenidos de arcilla mientras que la de macroagregados con la MO. De esta manera la MO asociada con fracciones de partículas menores a 20 um parece no contribuir significativamente a la estabilidad de macroagregados (Caravaca et al. 2004) y consecuentemente la influencia del manejo sobre los contenidos de MO tiene principalmente lugar en macroagregados (Wright y Hons 2005).

En base a lo expuesto y a estudios realizados (Quiroga 2002) que muestran un amplio rango de variación en los contenidos de arcilla (4 a 26%) y de limo (6 a 54%) se planteo como objetivo de uno de los trabajos "evaluar los efectos de variaciones en la granulometría, MO y el manejo sobre distintos aspectos de la estructura". Los resultados mostraron que la proporción de agregados mayores a 2 mm resultó variable entre 15 y 65% y se relacionó estrechamente con la fracción granulométrica menor a 50 um (R^2 = 0,79 en V y 0,51 en A) y en menor medida con la MO (R^2 = 0,31 en V y 0,27 en A). La Figura 11 muestra la relación entre contenidos de arcilla + limo y agregados para el total de los suelos (R^2 = 0,62).

A diferencia de lo comprobado con la proporción de agregados, la estabilidad de agregados en húmedo (EEH) no fue influenciada por variaciones en la granulometría (test de aditividad de Tukey 1949) mientras que resultó significativa la influencia de la MO (Figura 12). Con contenidos de MOj mayores a 10 tn ha^{-1} se alcanzaron valores de EEH aceptables (<1,5). A consecuencia de ello los suelos V presentaron agregados más estables ($p<0,05$) que los suelos A, con valores medios del índice de 0,96 (V) y 1,85 (A). Estos resultados son coincidentes con los de Elliot

(1986) quien comprobó que los suelos vírgenes poseen en general la misma característica estructural que los suelos cultivados pero los macroagregados resultaron más estables. Distintos autores relacionan estas diferencias con cambios en los contenidos de C por efecto del manejo (Bickerton 1988; Haynes y Swift 1990). Sin embargo, Thomas et al. (1997) señalan que el punto crítico de MO hasta el cual se incrementa la EEH varía de un suelo a otro y estaría relacionado en parte con los contenidos de las fracciones granulométricas más finas (Baver et al. 1972).

En relación con la influencia del manejo sobre la MO (Figura 13a) los suelos A (50,8 tn ha^{-1}) poseen significativamente menor contenido que suelos V (103,6 tn ha^{-1}), comprobándose un efecto significativo y positivo de las fracciones granulométricas más finas (Figura 13b). La mayor incidencia del manejo ha tenido lugar en las fracciones orgánicas más labiles las cuales tendrían una mayor participación en la estabilidad de los macroagregados (Elliot 1986; Caravaca et al. 2004). Sobre la base de estudios realizados por Casanovas et al. (1995) puede inferirse que como consecuencia de la descomposición de la fracción liviana han quedado como remanente en suelos A formas más estables de la MO, normalmente asociadas a la dinámica de microagregados. Esto se pone en evidencia al considerar la relación MOj/MO total entre suelos A (9,4%) y V (33,2%). En el mismo sentido, se comprueba un efecto diferencial del manejo sobre las fracciones orgánicas al considerar los contenidos de MOv (73%), MOi (36%) y MOj (14%) de suelos A respecto de los suelos V.

Asociado con la disminución en los contenidos de las fracciones más labiles de MO y de EEH, en los suelos A, se registraron incrementos en el peso medio de los agregados. El aumento en la densidad resultó de 16, 17 y 13% en agregados de 2-3, 3-4 y 4-8mm de diámetro. Tanto el coloide orgánico como la fracción granu-

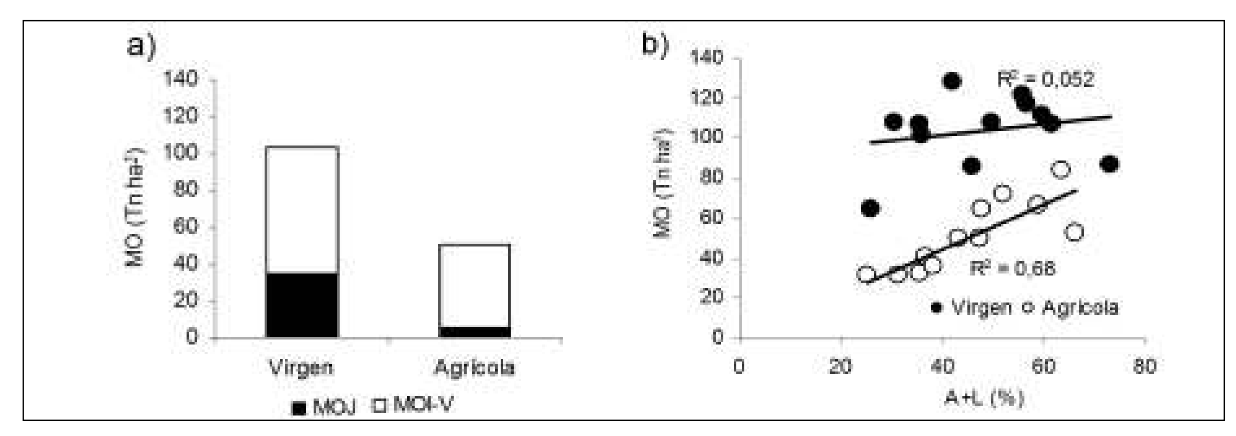


Figura 13. Contenidos promedio de MO en fracciones granulométricas < 100um (MOv) y de 100 a 2000um (MOj) en suelos bajo manejos contrastantes (a) e influencia del manejo sobre los contenidos de MO en suelos de distintas granulometrías (b).

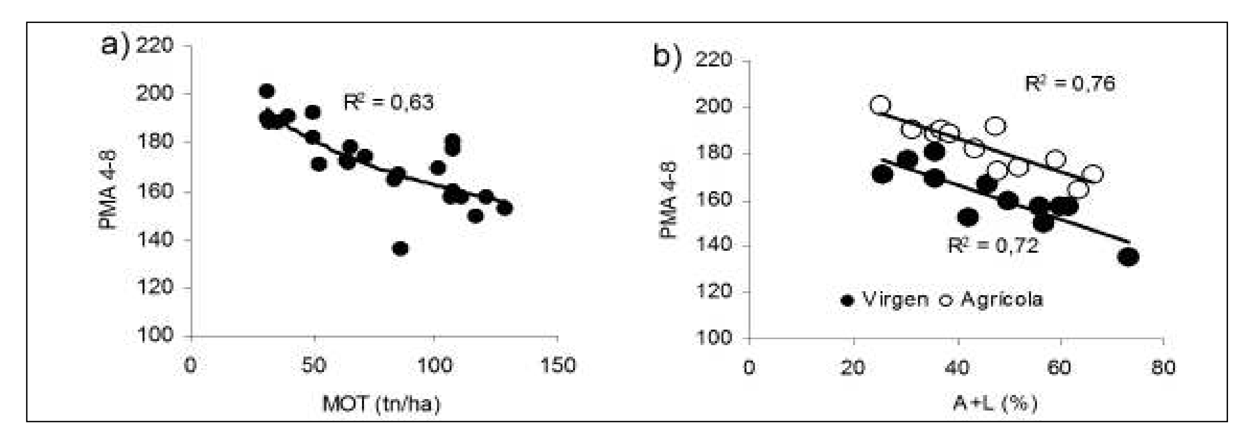


Figura 14. Peso medio de agregados (4-8mm) influenciados por el manejo y la granulometría (a) y por los contenidos de MO (b).

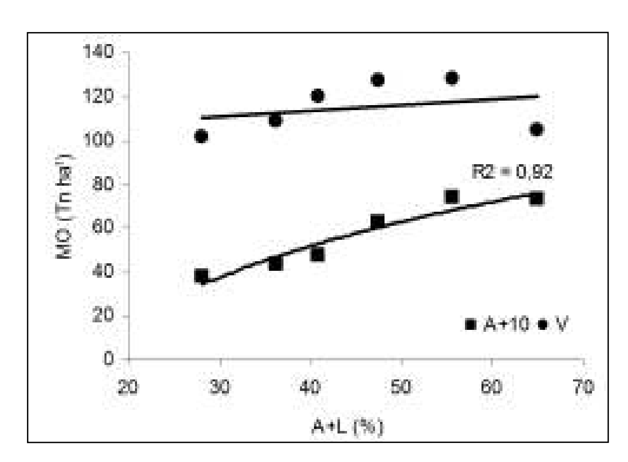


Figura 15. Variación de los contenidos de MO total en función de la granulometría para suelos vírgenes (V) y agrícolas con contenidos de 10 tn/ha de MOj (A+10).

lométrica influenciaron significativamente sobre este parámetro (Figuras 14 a y b).

Puede concluirse que el índice de EEH constituye un indicador edáfico discriminante de calidad de suelos en Molisoles y Entisoles de la RSP, al no registrarse interacción textura-manejo y al variar ante cambios en los contenidos de fracciones más labiles de MO. En la Figura 15 se han representado, para suelos de distintas granulometrías, los contenidos críticos de MO total, que contienen 10 tn ha^{-1} de MOJ, por debajo de los cuales el índice de EEH alcanzaría valores superiores a 1,5. Por otra parte se ha comprobado que existe restricción para considerar la distribución del tamaño de agregados por resultar la fracción mineral el principal factor determinante del mismo (efecto de aditividad). Este parámetro solo puede ser comparado entre suelos de similar granulometría, limitando en consecuencia los resultados a la condición de sitio, tal lo expuesto por Blanco-Canqui y Lal 2007. Sin embargo, para facilitar la comparación de algunos parámetros entre suelos puede resultar adecuado el uso de índices que consideren la influencia de variaciones en la granulometría, tal como la relación MO/ arcilla+limo utilizada para evaluar la productividad de cebada (Quiroga et al. 2006). El valor promedio del índice en suelos A (3,6) resultó significativamente inferior al de los suelos V (7,5) y correspondería a condiciones edificas con importantes limitaciones para cebada (Quiroga et al. 2006) y con suelos afectados de manera importante por procesos de degradación (Pieri 1995). Si bien estos resultados son preliminares, muestran la importancia de considerar la influencia conjunta de ambos coloides, orgánico y mineral, al evaluar parámetros físicos en Molisoles y Entisoles de la RSP.

Compactación

Toda perdida de poros incide sobre la dinámica del agua en el suelo y, cuando la intensidad de las precipitaciones supera la infiltración, se producen escurrimientos y/o encharcamientos temporarios. En las publicaciones periódicas (AAPRESID, AACREA, AACS) y en distintos congresos se ha abordado la problemática de la compactación mediante el análisis y evaluación de indicadores edáficos obtenidos, alguno de ellos, desde ensayos de compactación (Test Proctor): densidad aparente máxima (DA máx.), susceptibilidad a la compactación, contenido crítico de humedad, compactación relativa. En suelos de la RSP se ha comprobado que pequeños cambios en los contenidos de MO pueden modificar significativamente las características y funcionamiento del sistema poroso y consecuentemente la eficiencia de uso del agua pluvial.

Sobre este punto, Stengel et al. (1984) obtuvieron una ecuación de regresión que muestra el incremento necesario en los contenidos de MO para disminuir en 0,1 g cm^{-3} la DA. Quiroga et al. (1999) indican que un incremento de aproximadamente 5 g kg^{-1} en el contenido de MO dio lugar a una disminución de 0,06 g cm^{-3} en la DA max, en Haplustoles Enticos de la RSP. En la Figura 16 se representan los valores de DA max en función de la humedad para dos módulos de labranzas, localizados en suelos texturas contrastantes de Macachín y Anguil. Se comprobó un importante efecto de la textura y del manejo al comparar las

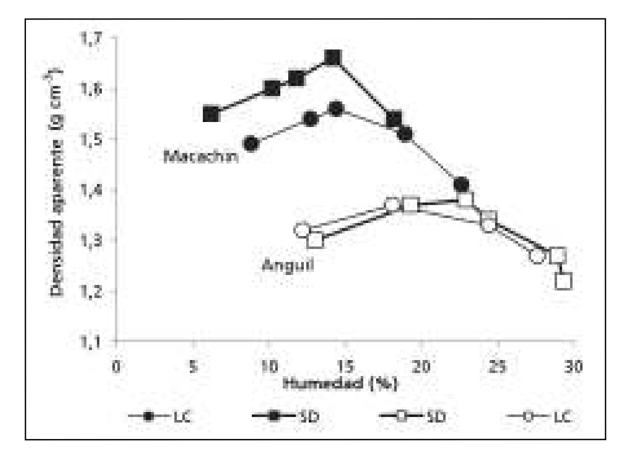


Figura 16. Densidad aparente máxima (g cm^{-3}) en suelo arenoso franco (Macachin) y franco (Anguil) bajo SD y LC.

curvas entre ambos sitios y de los sistemas de labranzas en cada sitio. Los suelos bajo agricultura convencional han experimentado aumentos en la DA y susceptibilidad a la compactación, a la vez que disminuciones de la EEH, la velocidad de infiltración y la conductividad hidráulica (Quiroga et al. 1999). Estos cambios físicos en el suelo afectarían significativamente la tasa de mineralización y contenidos de MO, en mayor grado la tasa de mineralización del nitrógeno, condicionando significativamente la productividad de los cultivos. Se ha observado además que la densificación en los suelos más degradados tiende a lograrse a contenidos hídricos menores que en suelos de similar granulometría y con mayor contenido de MO. De confirmarse estos resultados preliminares las variaciones en los umbrales hídricos de cambio de estado pueden ser atribuidas a menores contenidos de MO. Estos cambios físicos tienen un marcado efecto sobre aspectos biológicos y necesariamente deben ser considerados al realizar un diagnóstico y/o definir estrategias de manejo en base a los indicadores mencionados.

Agua y sistemas mixtos de producción

Los sistemas mixtos de producción se encuentran ampliamente difundidos en las Región Semiárida y Subhúmeda Pampeana (RSSP), comprendiendo las planicies con tosca y medanosa de La Pampa, Sur de Córdoba, Este de San Luís y Oeste de Buenos Aires. Particularmente en esta área el manejo del agua es un factor trascendente a tener en cuenta por constituir el principal limitante de la producción condicionando en no pocos casos la viabilidad de los planteos productivos. Aspectos como la captación, capacidad y eficiencia de almacenaje y la eficiencia de uso del agua deben ser especialmente considerados al planificar el sistema de producción, la secuencia de cultivos y la estrategia de manejo de un cultivo en particular. Para interpretar la importancia de estos aspectos, tratados en los puntos anteriores de este capítulo, serán consideradas tres ecuaciones:

Ecuación 1:

Agua útil (AU) (mm) =
profundidad x (C.C – PMP) x DA=50 a 200 mm

Donde:
Profundidad= espesor de suelo explorado por las raíces.
CC= humedad de capacidad de campo
PMP= humedad de punto de marchites permanente
DA= densidad aparente

Esta ecuación muestra que la AU de los suelos varía ampliamente en la región (50 a 200 mm) y resulta determinante de "la vocación productiva del lote". Este término resulta muy práctico al momento de analizar la viabilidad de un sistema de producción (cría, invernada, tambo, agricultura de verano). Por ejemplo un establecimiento de la planicie con tosca que posee suelos con capacidad de almacenar 80 mm de agua difícilmente pueda basar su producción en cultivos de cosecha gruesa. En este caso el sistema de producción estará fuertemente condicionado por el recurso suelo (y clima) antes que por el sistema de labranza, fertilización, genética, etc. Esta variación en la CRA (textura y espesor de suelo) conjuntamente con variaciones en la precipitación condicionan el régimen hídrico de los suelos incidiendo significativamente sobre la productividad de los cultivos y el balance de carbono de los suelos.

Luego de considerar la viabilidad de un sistema de producción para una determinada condición de sitio (suelo y clima), es conveniente analizar la secuencia de cultivos a utilizar. Por tratarse de la región semiárida, al referirnos a la rotación de cultivos, consideramos oportuno introducir el concepto de "secuencia de usos consuntivos". Es decir que el productor deberá definir una estrategia de manejo para cada lote en particular a fin de cubrir los requerimientos de agua de los distintos cultivos. Es muy importante considerar la "influencia del cultivo antecesor" y el manejo del agua previo a la siembra dado que las precipitaciones normalmente no cubren los requerimientos de uso consuntivo en cultivos de buen rendimiento. En este sentido la ecuación 2 resulta de fundamental importancia al momento de analizar una secuencia de cultivos.

Ecuación 2:

Agua útil a la siembra =
Profundidad X (humedad a la siembra – PMP) x
DA = 0-200 mm

La secuencia de los cultivos (determinante de la longitud de barbechos) y la cobertura (sistema de labranza) inciden de manera significativa sobre la captación y eficiencia de almacenaje del agua en el suelo. De esta manera los contenidos de AU a la siembra de un cultivo pueden variar ampliamente (0-200 mm). Es necesario considerar además, como se expreso anteriormente, la influencia del régimen

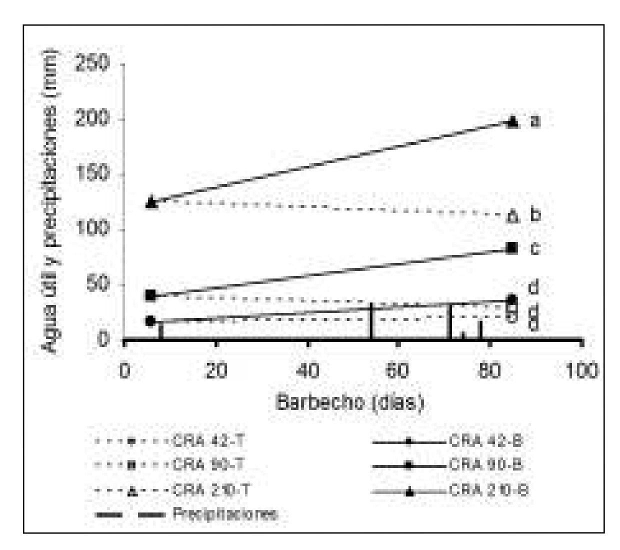


Figura 17. Efecto de la capacidad de retención de agua del suelo sobre el agua útil almacenada durante el barbecho. B= barbecho, T= sin barbecho. Letras distintas indican diferencias al 5%.

hídrico (precipitaciones y CRA). En tal sentido, la Figura 17 muestra como la eficiencia del barbecho para almacenar agua resulto dependiente de la CRA, evaluada en 3 perfiles de suelo de un mismo lote (influencia del relieve).

Desde el punto de vista práctico puede plantearse que dos potreros linderos: a) con la misma CRA, precipitación y sistema de labranza pueden dar lugar a rendimientos contrastantes como consecuencia de diferencias en la secuencia y/o manejo del cultivo antecesor; b) bajo el mismo régimen de precipitación, sistema de labranza y secuencia de cultivos pueden dar lugar a rendimiento distintos en función de diferencias en la CRA.

Por ejemplo estudios realizados en la región han mostrado a la siembra de verdeos de invierno un amplio rango de variación en los contenidos de AU en función del cultivo antecesor: girasol (10 mm), trigo (130 mm) y pastura (50 mm). De manera similar se comprobó que cuando la siembra de pastura se realizó sobre girasol (10 mm) la disponibilidad de agua resultó menor que cuando se realizó sobre trigo (210 mm). El proceso de agriculturización ha implicado que muchos productores no realicen barbecho estival (por ejemplo antecesor trigo), predominando antecesores como girasol, maíz e incluso soja, dando lugar a bajos contenidos de agua a la siembra de verdeos y pasturas.

Otro aspecto a evaluar, principalmente en sistemas mixtos de regiones semiáridas, son los usos consuntivos simultáneos que tienen lugar bajo pasturas perennes polifíticas. Estudios realizados por Vallejo et al (2002) muestran la importancia que posee este tema en los sistemas ganaderos de cría y recría localizados sobre Haplustoles de las Unidades cartográficas de Mesetas y Valles y de Mesetas Relictos de relieve plano, con precipitaciones que oscilan entre 450 y 700 mm. Si bien uno de los aspectos buscados en las pasturas polifiticas es el aporte de N de las leguminosas, se comprueba visualmente la fuerte competencia por el agua en estos ambientes semiáridos.

La baja capacidad de los suelos para almacenar agua al ser limitados por la presencia de tosca y los altos requerimientos de la pastura determinan que con frecuencia el perfil alcance valores de humedad del PMP. A consecuencia de ello y como un mecanismo de defensa se producen defoliaciones recurrentes dando lugar a una baja disponibilidad de forraje. A fin de optimizar la productividad de la gramínea y evaluar su comportamiento respecto al uso del agua se establecieron pasturas de pasto ovillo puro, con algunas variantes respecto al manejo de la fertilidad nitrogenada (fertilización de primavera y otoño e intersiembra de vicia). La Figura 18 muestra la evolución del AU en ambos perfiles de suelo, bajo pastura polifitica (PP) y de pasto ovillo (PO).

Los resultados, si bien preliminares, son muy interesantes respecto a las diferencias en la disponibilidad del agua entre pasturas, especialmente durante el verano y otoño. Asociado a una mayor disponibilidad de agua se comprueba que el periodo de producción

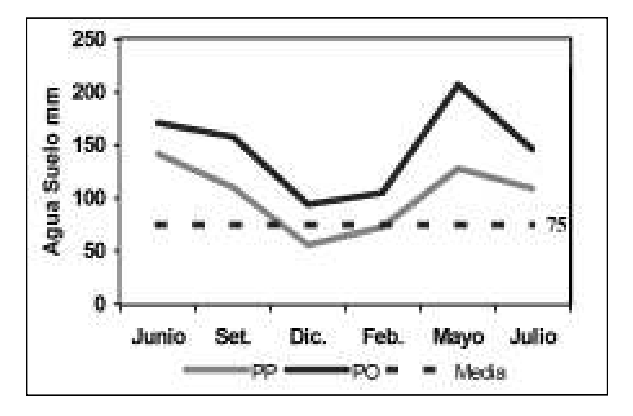


Figura 18. Variación del agua disponible en el perfil del suelo (mm/80 cm) bajo pastura polifítica y pasto ovillo. 75 mm representa el punto de marchitez permanente.

del pasto ovillo se prolonga con la posibilidad de reducir la superficie destinada a verdeo de invierno. Además la mayor disponibilidad de agua genera mejores condiciones para la fertilización nitrogenada. Al momento de decidir la estrategia de fertilización, principalmente postergada, resulta adecuado utilizar la ecuación 3:

Ecuación 3:

Agua útil =
Profundidad X (humedad a los 2 hojas – PMP) x DA = 0-200mm

La ecuación 3 permite calcular el contenido de agua que puede tener el suelo al momento de decidir una fertilización nitrogenada en verdeo (2 hojas). Resultados de 8 años de experimentación muestran que en suelos con contenidos inferiores a 80 mm de agua útil (fin de marzo) no es aconsejable la fertilización nitrogenada. De la misma manera se realizan evaluaciones a 6 hojas en maíz, 4 pares de hojas en girasol, macollaje de trigo.

Productividad económica del agua

Otro enfoque sobre la productividad de los cultivos y su eficiencia de uso del agua (EUA), es considerar el valor económico de la producción en lugar de comparar solamente los rendimientos. Nielsen et al. (2005), compararon diferentes sistemas de producción de las llanuras centrales de EEUU, concluyendo que la intensificación de la producción resulta beneficiosa cuando se tiene en cuenta el valor de los productos. Aplicando esta metodología, se ha encontrado que en los sistemas de producción agrícola de la RSP, las oleaginosas tienen EUA considerablemente inferiores a las gramíneas, pero cuando se tiene en cuenta su valor de mercado, la EUA por unidad de superficie incrementa considerablemente hasta casi igualar la de maíz, en el caso de girasol. Varios autores señalan la necesidad de aumentar la productividad económica del agua (PEA), definida como el valor recibido por unidad de agua usada ($ mm^{-1}), especialmente en áreas donde el recurso agua es escaso (Aldaya et al. 2009; Molden et al. 2009; Ali y Talukder 2008). Este objetivo puede lograrse ya sea por un incremento en la productividad física del agua que lleve a producir más kg de grano mm^{-1} como por la producción de cultivos de más elevado valor.

En la EEA INTA Anguil, La Pampa, se están llevando a cabo ensayos en los que se evalúa el comportamiento de distintos cultivos y cultivares, tanto tradicionales como alternativos, con el objetivo de identificar aquellos que brindan la mejor PEA. Por ejemplo, en la campaña 2011, para un suelo de textura franca con manto calcáreo a profundidades de 1-1,2 m, la EUA resultó ser de 3,7 kg mm^{-1} para colza primaveral, 4,5 kg mm^{-1} en colza invernal, 5,4 kg mm^{-1} en cártamo, 11,4 kg mm^{-1} en trigos pertenecientes al grupo 1 de calidad panadera, 13,1 kg/mm en trigos grupo 3 y 14 kg mm^{-1} en cebada cervecera. Asimismo, la PEA varió ampliamente, siendo mayor para cebada. Si bien estos estudios son preliminares, los mismos serán realizados durante los próximos tres años para evaluar alternativas en cultivos de invierno y de verano, en suelos con limitaciones de zonas marginales para la producción de granos.

Determinación práctica del contenido de agua

El conocimiento expeditivo del contenido de agua en el suelo resulta relevante para la toma de decisiones en los sistemas de producción localizados en las regiones semiáridas y subhúmedas. Categorizar los lotes en base a sus reservas de AU en un determinado momento (siembra, fertilización, aplicación herbicidas, fungicidas) resulta estratégico para optimizar el uso de tecnología y obtener respuestas positivas y rentables. La estimación de humedad en profundidad tiene fines prácticos, viéndose limitada su ejecución cuando es necesario obtener información de muchos lotes y tomar decisiones en el corto plazo. Esta limitación ha tratado de ser superada generando métodos sencillos de campo de estimación de humedad. Durante los últimos 10 años se han dictado cursos de capacitación para productores y profesionales, de La Pampa, Oeste de Bs As., Sur de Córdoba y San Luís, tendientes a estimar los contenidos de agua en el perfil explorado por las raíces de los cultivos que integran la rotación. En base a lo expuesto anteriormente resulta necesario tener conocimiento de la profundidad efectiva de las raíces y de los factores que pueden condicionar su normal desarrollo. Para determinar humedad en el perfil existen métodos expeditivos. A continuación se menciona una breve reseña de los mismos.

Humedad a campo al tacto

A) Familiarizarse al tacto con tres tipos de suelos de textura diferente más comunes en la RSP: Arenosos

AU (mm/20cm)	40 – 50% arena	60-70% arena	80-90% arena
PMP (0% AU)	---	----	----
50% AU	10-12 mm	6-8 mm	4-6 mm
CC (100% AU)	20-25 mm	15-18 mm	10-12 mm

Tabla 5. Contenidos de agua útil cada 20 cm de espesor (mm) en suelos de distintas texturas.

80-90 % (textura gruesa), francos 40-50 % de arena (textura fina) y suelos de textura intermedia entre los anteriores. En primer termino reconocer los suelos en seco (diferencias texturales) y luego en 3 estados de humedad, correspondientes a 0, 50 y 100% de agua útil.

B) Ir a cada lote con pala barreno y luego de haber identificado el tipo de suelo, sacar muestras cada 20 cm hasta la tosca, 140 cm o mayor profundidad si se quiere conocer la profundidad de la napa freática. Al tacto calcular cuantos mm de agua tiene cada capa y obtener los mm totales en el perfil.

Con la información obtenida a campo de cada lote se pueden tener varias alternativas, suelo seco en todo el perfil, humedad solo en los primeros cm, humedad en profundidad por ejemplo a partir de los 50-60 cm y humedad en todo el perfil (Figura 19). Pero lo más importante es conocer cuantos mm faltan para recargar el perfil y de está manera poder implementar estrategias de manejo tales como: iniciar una siembra, elegir el cultivo, seleccionar un cultivar, aplicar un herbicida, realizar una fertilización etc.

Complementariamente, en sitios con presencia de napa de agua en los primeros 250 cm del perfil, se pueden colocar freatímetros para predecir la posible contribución de la misma al uso consuntivo de los cultivos. La profundidad de la napa, el ascenso capilar y la profundidad efectiva de las raíces son tres aspectos que están incorporándose en la elaboración de estrategias de manejo, tanto en La Pampa como en San Luís.

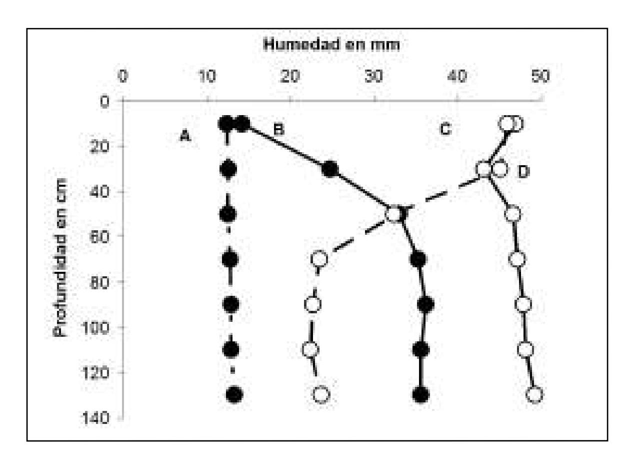


Figura 19. Perfil de humedad hasta los 140 cm con 4 alterativas posibles a) suelo seco en todo el perfil b) humedad solo en los primeros cm, luego seco, c) humedad en profundidad y d) humedad en todo el perfil.

Método gravimétrico utilizando horno microondas

Para determinar el contenido de agua utilizando el horno microondas, es necesario tener en cuenta algunos aspectos relacionados con la muestra de suelo y el recipiente a utilizar.

La muestra de suelo: luego de tomada, la misma debe ser procesada lo más rápido posible para evitar las pérdidas de humedad. En caso que no se analice rápidamente almacénelas en recipientes herméticos para prevenir la pérdida de agua. Rompa el suelo en agregados de tamaño pequeño para ayudar a obtener un secado más uniforme.

El recipiente (plásticos para análisis clínico): el recipiente que usted utilice debe resistir el calentamiento en microondas. Hay que tener en cuenta que el suelo actúa como un refractario tomando elevadas temperaturas y el recipiente puede sobrecalentarse y derretirse. Se aconseja antes de realizar la determinación hacer algunas pruebas con los tiempos abajo sugeridos con los recipientes elegidos, además de repetir esta operación con un poco de muestra de suelo.

¿Cómo determino la humedad?: Pesar el recipiente seco y limpio en una balanza y anote el valor (T), luego pese aproximadamente 20 g de suelo en el recipiente, vuelva a pesar y registre el dato (MH). Prepare el horno de microondas para ser usado a una potencia del 70% (depende del horno microondas) o 630 W de potencia o un valor cercano. Coloque los recipientes y seque 5 minutos de la siguiente manera:

- 2 minutos, homogenizar la muestra
- 1 minuto, homogenizar
- 1 minuto, homogenizar
- 1 minuto

Después de que ha pasado el tiempo de secado, retire el recipiente del horno, espere que éste se enfríe (colocándolo en un desecador o tapar con tapa en los recipientes en que sea posible). Luego realizar la pesada de las muestras secas (MS).

El contenido de **agua (%H)** puede calcularse:

$$\%H = \frac{MH-MS}{MS-T} .x\ 100$$

MH = masa del recipiente y el suelo húmedo.
MS = masa del recipiente y el suelo seco.
T = masa del recipiente

Por ejemplo, si el recipiente peso 6 g significa que T = 6 g; si el reciente con muestra de suelo húmedo peso 18 g, significa que MH=18 g y si el recipiente con el suelo después de secado pesó 16 g, significa que MS=16 g. Entonces esta muestra tiene una humedad de:

$$\%H = \frac{18-16}{16-6} .x\ 100 = 20\ \%$$

Para pasar éste valor de humedad a milímetros, es necesario tener en cuenta algunos factores tales como las unidades en que se trabaja, la textura, la densidad aparente. La densidad aparente depende de la textura. En nuestra región predominan los suelos franco, franco arenoso y arenosos. Si no se conoce el valor de la densidad aparente puede utilizarse los siguientes valores según el tipo de textura:

para suelos arenosos: 1250 kg/m^3
para suelos francos: 1050 kg/m^3
para suelos franco arenoso o arenoso franco: 1100 kg/m^3

$$\text{De \% a mm} = \frac{\text{Área x Profundidad x Densidad Aparente x Humedad}}{1000}$$

Las unidades en que debe expresarse cada variable son:
Área en m^2
Profundidad en m (en éste caso tomamos 0.20 m)
Densidad Aparente en Kg/m^3
Humedad en %(kg/100 kg)

$$\text{De \% a mm} = \frac{100\ m * 100m * 0.20\ m * 1{,}2\ kg/m^3 * 20\ kg/100\ kg}{1000\ kg/m^3} = 480\ m^3$$

$$\text{De m3 a mm} = \frac{480\ m^3}{10000\ m^2} = 0.048\ m\ o\ 48\ mm$$

En el capítulo XV Manejo de unidades se encuentra el desarrollo de éstas fórmulas.

Modelos de regresión sencillos para estimar el contenido de agua en todo el perfil usando la humedad superficial

Poder estimar la humedad del suelo hasta 140 cm de profundidad o más, sobre la base de muestreos superficiales, sería de utilidad para realizar balances hídricos y aplicar modelos explicativos de los rendimientos como los desarrollados para trigo. Utilizando como variables predictivas la lámina de agua en el estrato 0-20 cm del suelo y la profundidad del suelo hasta la tosca se explicó 68 % de la variabilidad de la lámina contenida en el suelo hasta 140 cm. Incorporando contenido de agua en la capa 20-40 cm se pasó a explicar 78 % de la variabilidad. El mejor modelo se logró usando la lámina de agua sumada en los estratos 0-20, 20-40 y 40-60 cm. Este modelo explicó 87 % de la variabilidad de la lámina almacenada en el suelo hasta 140 cm de profundidad (Bono y Álvarez 2012) (Tabla 6).

Bibliografía

• Aldaya M. M., P. Martínez-Santos y M. R. Llamas. 2009. Incorporating the water footprint and virtual water into policy: reflections from the Mancha Occidental region, Spain. Water Resource Management.doi 10.1007/s11269-009-9480-8.

Modelo	Ecuación
1	L 0-140 = 43.9 - 0.0286 * L 0-20 + 0.0524 * L 0-20 * P
2	L 0-140 = 23.6 - 0.00410 * L 0-40 + 0.0258 * L 0-40 * P
3	L 0-140 = -10.9 + 0.425 * L 0-60 - 0.00280 * L 0-60^2 + 0.0170 * L0-60 * P

Donde: L 0-140: lámina en el estrato 0-140 cm (mm), L 0-20: lámina en el estrato 0-20 cm (mm), L 0-40: lámina en el estrato 0-40 cm (mm), L 0-60: lámina en el estrato 0-60 cm (mm), P: profundidad del perfil hasta la tosca.

Tabla 6. Modelos de regresión para estimar el contenido de agua hasta los 140 cm de profundidad en suelos de las Regiones Semiárida y Subhúmeda Pampeana.

• Ali M. H. y M. S. U. Talukder. 2008. Increasing water productivity in crop production – A synthesis. Agric. Water Manage. 95:1201-1213.
• Álvarez C. 2007. Efecto del sistema de labranza sobre propiedades de un Hapludol Típico y un Haplustol Entico de la Pampa Arenosa. Tesis Magister en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Sur. B. Blanca. Argentina. 65 pp.
• Baver L., W. Gardner y W. Gardner. 1972. Soil Physics. Ed. J. Wiley and Sons, NY 529pp.
• Blanco-Canqui H. y R. Lal. 2007. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till. Soil Till. Res. 95:240-254.
• Bickerton D. 1988. Measurement of soil aggregate stability by wet sieving with results from tillage experiments. Scottish Centre of agric. Eng.12:16pp
• Boix-Fayos C., Calvo-Cases A., Imeson A. y M. Soriano Soto. 2001. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of agregate size and stability as land degradation indicators. Catena 44:47-67.
• Bono A. y R. Álvarez. 2012. Use of surface soil moisture to estimate profile water storage by polynomial regression and artificial neural networks. Agronomy Journal jul-ag.
• Campbell C. y W. Souster. 1982. Loss of organic matter and potentially mineralizable nitrogen from Saskatchewan soils due to cropping. Can. J. Soil Sci. 62:651-656.
• Caravaca F., Lax A. y J. Albaladejo. 2004. Agrégate stability and carbon characteristics of particle-size fractions in cultivated and forested soils of semiarid Spain. Soil Till. Res. 78:83-90.
• Casanovas E., H. Echeverria y G Studdert. 1995. Materia orgánica del suelo bajo rotaciones de cultivos. Contenido total y de distintas fracciones. Ciencia del Suelo 13:16-20.
• Daddow R. y G. Warrington. 1983. Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. USDA Forest Service, Fort Collins, Colorado. 15pp.
• De Boodt M. y L. De Leenheer. 1967. West european methods for soil structure determinations. The St. Faculty Agric. Sci. 7 Ghent, 60-62.
• Elliot E. 1986. Aggregate structure and carbon , nitrigen, and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 50:627-633
• Fernández R. 2007. Efecto de la cobertura del suelo durante el barbecho para cultivos estivales en la región semiárida pampeana. Tesis Magister en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. Argentina. 72 pp.
• Fontana F., M. Paturlane, M. Saks y A. Quiroga. 2006. Efecto del suelo sobre propiedades edáficas y rendimiento de trigo en la región semiárida pampeana. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.
• Funaro D. 2007. Efecto del régimen hídrico y calidad de los suelos sobre el rendimiento y respuesta a la fertilización nitrogenada de girasol en la Región Semiárida Pampeana. Tesis Magister en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. Argentina. 93 pp.
• Ferraris G., F. Gutierrez Boem y H. Echeverría. 2002. Respuesta a la fertilización en el cultivo de soja de primera. Inf. Inv. Agric. (IDIA), INTA XXI:52-58.
• Franzluebbers A. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. Soil Till. Res. 66:95-106.
Gil R. 2007. El comportamiento físico funcional de los suelos. Página web: www.agriculturadeprecision.org
• Haynes R. y R. Swift. 1990. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. J. Soil. Sci. : 73-83
• Molden D., T. Oweis, P. Steduto, P. Bindraban, M. A. Hanjra y J. Kijne. 2009. Improving agricultural water productivity: between optimism and caution. Agric. Water Manage. 97:528-535.
• Nielsen D. C., P. W. Unger y P. R. Miller. 2005. Efficient Water Use in Dryland Cropping Systems in the Great Plains. Agron. J. 97:364–372.
• Pieri C. 1995. Long term soil management experimets in semiarid Francophone Africa. Adv. Soil Sci. 163:591-597.
• Quiroga A. 2002. Indicadores de calidad de suelos en molisoles de la región semiárida pampeana. Relación con el manejo y productividad de cultivos. Tesis Doctor en Agronomía. Universidad Nacional del Sur.
• Quiroga A., D. Buschiazzo y N. Peinemann. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. Soil Till. Res. 52:21-28.
• Quiroga A., D. Funaro, E. Noellemeyer y N. Peinemann. 2006. Barley yield response tos oil organic matter and textura in the Pampas of Argentina. Soil Till. Res. 90:63-68.
• Quiroga A. y M. Monsalvo.1989. Influencia de la siembra directa sobre algunas propiedades físicas de un suelo Haplustol .entico. INTA Anguil, Carp Ecol. : 68-74 pp.
• Satrorre E., R. Benech Arnold, G. Slafer, E. de la Fuente, D. Miralles, M. Otegui y R. Savin. 2004. Producción de Granos . Bases funcionales para su manejo. Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires.
• Stengel P., J. Douglas, J. Guerif, M. Goss, R. Monnier y R. Cannell.1984. Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drill. Soil Till. Res. 4:35-53
• Thomas G., M. Sorokina y D. Scott Adams. 1997. Siembra directa y la calidad del suelo. V Cong. Nac. AAPRESID, 201pp.
• Tisdall J. y J. Oades. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. In Modification of Soil Structure (Emerson, Bond and Dexter, Ed.):137-144.
• Tukey J. 1949. One degree of freedom for non-additivity. Biometrics, 5:232-242.
• Vallejo A., R. Souto y A. Quiroga. 2002. Siembra Directa y Fertilización. Sistemas ganaderos de la region semiárida. Bol. Divulg. técnica Nº 74. INTA Anguil.
• Wright A. y F. Hons. 2005. Tillage impacts on soil aggregation and carbon and nitrogen sequestration under wheat cropping sequences. Soil Till. Res. 84:67-75

Romina Fernández, Alberto Quiroga, Elke Noellemeyer, Matías Saks, Fernando Arenas y Carlos Antonini

Inclusión de cultivos de cobertura en sistemas de producción de la Región Semiárida Pampeana

Los sistemas de producción de la Región Semiárida y Subhúmeda Pampeana han experimentado importantes cambios durante los últimos 15 años. En muchos casos el proceso de agriculturización, a partir de una mayor participación de cultivos de verano ha significado una importante reducción en el aporte de residuos y en los contenidos de materia orgánica (MO), acentuándose los procesos de degradación física y de pérdidas de suelo por erosión. Tanto en suelos de La Pampa como de San Luís es frecuente comprobar, aún bajo siembra directa continua, perdidas de suelo por erosión eólica. Frente a esta situación surge la posibilidad de establecer cultivos de cobertura como una alternativa para mantener o atenuar la pérdida de carbono (C) de los suelos, prevenir su erosión, aumentar la infiltración, capturar nutrientes reduciendo la contaminación de napas y contribuir al control de malezas (Daliparthy et al. 1994).

En relación con la MO se ha comprobado que los cultivos de cobertura inciden tanto sobre su cantidad como sobre su calidad. Wander y Traina (1996) comprobaron que los contenidos de MO fueron significativamente mayores cuando se incorporaron cultivos de cobertura a la rotación. Por su parte Ding et al. (2005) comprobaron que la inclusión de cultivos de cobertura afectó positivamente y en mayor grado las fracciones livianas de la MO. Intercalar cultivos invernales podría ser una alternativa a evaluar para proveer de residuos ricos en carbono y promover al desarrollo y al mantenimiento de la cobertura de los suelos. Pero, se reconoce que el consumo hídrico de estos durante el invierno podría interferir en la normal oferta de agua para el cultivo sucesor (Duarte 2002). Además, se desconocen en estos suelos sus efectos de corto y largo plazo sobre la producción de cultivos según diferentes estrategias de manejo, dando lugar a diferentes duraciones de barbechos y calidad de los residuos provistos.

Varias gramíneas de invierno tales como centeno, avena o raigrás anual son utilizadas como cultivos de cobertura logrando una alta acumulación de biomasa aprovechando su crecimiento entre cultivos consecutivos de soja. (Álvarez et al 2006). Según Ruffo (2003), el momento de terminación del crecimiento de estos cultivos de cobertura debe adecuarse siguiendo dos criterios: (a) lograr una acumulación de biomasa que garantice una importante cobertura y aportes de carbono y, (b) ajustarse zonalmente a las precipitaciones de cada región para asegurar la recarga del perfil con las lluvias de primavera.

Producción de cultivos de cobertura

En los últimos 5 años se han establecido ensayos de cultivos de cobertura en una amplia región con diferente régimen hídrico, abarcando la región subhúmeda de la provincia de Buenos Aires, la región semiárida de la provincia de La Pampa y Mendoza, aunque esta última bajo riego. En la Tabla 1 se presentan las producciones de materia seca de distintas especies utilizadas como cultivos de cobertura en 12 sitios. En los sitios 1 a 4 (provincia de Buenos Aires) la especie de mayor producción fue el centeno, variando de 10505 a 6083 kg MS ha^{-1}, el triticale también aportó una buena cantidad de rastrojo (6660-6953 kg MS ha^{-1}), la avena varió entre 7443 a 5952 kg MS ha^{-1}, y el rye grass entre 6384 a 3800 kg MS ha^{-1}. También en los sitios 5 a 9 (provincia de La Pampa) el centeno fue la especie de mayor producción variando entre 4400 a 6727 kg MS ha^{-1}, los resultados promedios de avena y rye grass fueron 1745, 1375 kg MS ha^{-1} respectivamente. En los sitios 10 a 12 (zona bajo riego de Mendoza) las producciones promedios de centeno, avena y cebada fueron 3276, 2866, 2968 kg MS ha^{-1} respectivamente.

Considerando la especie de mayor rendimiento (centeno) y en la condición de sitio mas favorable se

SITIO	Centeno (kg ha^{-1})	Avena (kg ha^{-1})	Cebada (kg ha^{-1})	Rye Grass (kg ha^{-1})	Triticale (kg ha^{-1})
1-G. Pinto	10505	7443	sd	6384	sd
2- Villegas	6124	6080	sd	3800	sd
3- Villegas	8428	5952	sd	4463	6660
4- Villegas	6083	5955	sd	5088	6953
5- M.Lauquen	4400	sd	sd	1566	sd
6- M.Lauquen	6168	sd	sd	1568	sd
7- M.Lauquen	5088	sd	sd	1472	sd
8- Dorila	6727	2601	sd	905	sd
9- Dorila	4781	889	1027	sd	sd
10- San Rafael	3692	3438	3552	sd	sd
11- Tunuyan	2388	2172	2088	sd	sd
12- Porteños	3750	2988	3264	sd	sd

Tabla 1. Producción (kg MS ha^{-1}) gramíneas invernales utilizadas como cultivo de cobertura en 12 sitios localizados en las provincias de Buenos Aires, La Pampa y Mendoza.

comprobó que el aporte de carbono al sistema suelo fue de 3694 kg ha^{-1}, con contenidos en biomasa de 95 kg ha^{-1} de nitrógeno (N), 10 kg ha^{-1} de fósforo (P) y 10 kg ha^{-1} de azufre (S). El mismo cultivo, aunque en condiciones de sitio menos favorables, el aporte de los nutrientes fue 840 kg de C ha^{-1}, 21 kg N ha^{-1}, 2.2 kg P ha^{-1}ha y 2.3 kg S ha^{-1}.

Estos resultados preliminares muestran que los cultivos de cobertura pueden realizar un significativo aporte al balance de los nutrientes, modificando algunos compartimentos del ciclo de los mismos (por ej. N), al incorporar parte del N inorgánico disponible en el suelo durante el largo periodo de barbecho a formas orgánicas. Consecuentemente menos nitrógeno queda disponible para la lixiviación en suelos de texturas gruesas.

Tecnología en los cultivos de cobertura (fertilización y fecha de secado)

En base a estudios realizados en la región sobre fertilización en cereales de invierno, y a la importante respuesta de los mismos a N y P, se plantea la posibilidad de adelantar la fertilización del cultivo de cosecha gruesa sucesor al cultivo de cobertura. Además un aspecto importante a considerar es que la época de secado del cultivo de cobertura, garantice el mayor aporte posible de carbono sin afectar los contenidos de agua para el cultivo siguiente. De la Figura 1 se desprende que para cada época de secado (J: julio, A: agosto y S: septiembre) del cultivo de cobertura, en este caso centeno, hubo una importante respuesta a la fertilización nitrogenada. Además cuanto mas tarde se secó el centeno mayor fue la producción de biomasa. La menor producción se obtuvo en el testigo (T) secado en julio (J) con 2051 kg MS ha^{-1}, mientras que la mayor producción (4917 kg MS ha^{-1}) fue el fertilizado (F) secado en septiembre (S).

Además de la preocupación que existe en la región sobre el balance de carbono y a partir del incremento en el costo de los fertilizantes, han aumentado también los requerimientos de información respecto de la contribución de nitrógeno (fijación biológica) que pueden realizar las leguminosas anuales como vicia. En algunas secuencias de cultivos, con una importante participación de gramíneas como sorgo y maíz, puede resultar de mayor interés la incorporación de leguminosas como cultivo de cobertura, considerando que el mayor aporte de C lo realizarían los cultivos de cosecha.

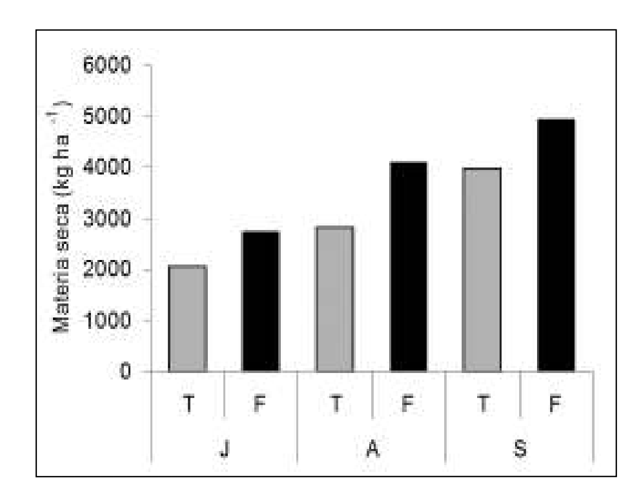


Figura 1. Producción de biomasa (kg MS ha^{-1}) de centeno en T: testigo y F: fertilizado en tres épocas de secado: J:julio, A: agosto y S:septiembre.

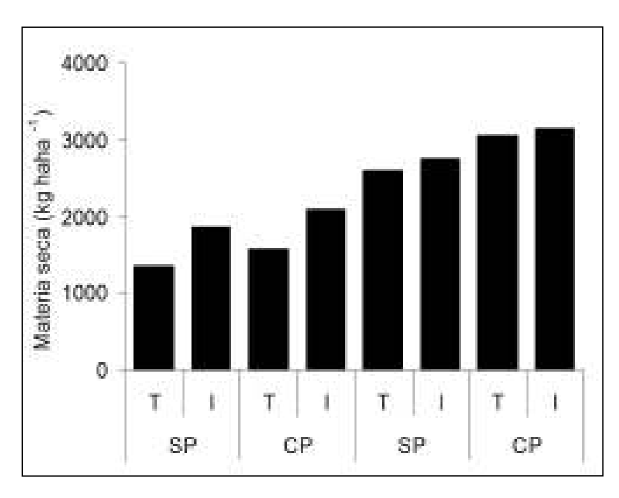


Figura 2. Producción de biomasa (kg MS ha^{-1}) de vicia en dos sitios, SP: sin fertilizar con P y CP: fertilizada con P, I: inoculada y T: sin inocular.

La Figura 2 muestra que la producción de materia seca de vicia fue mayor en el Sitio 2 (2877 kg MS ha-1 de promedio) mientras que en el Sitio 1 el promedio fue de 1717 kg MS ha^{-1}. Además la fertilización con P en ambos sitios produjo un aumento en la biomasa (sitio 1, respuesta promedio 225 kg MS ha^{-1}; sitio 2 respuesta promedio 431 kg MS ha^{-1}), lo mismo ocurrió con la inoculación de la vicia, donde la respuesta por el uso del inoculante fue de 513 kg MS ha^{-1} en el sitio 1 y 133 kg MS ha^{-1} en el sitio 2.

En las Figuras 3, 4 y 5 se presentan resultados preliminares relacionados al aporte que hacen los cultivos de cobertura al balance de C, N, P y S. Claramente se puede observar que el aporte de estos nutrientes dependerá si se realiza cultivos de cobertura en la rotación o no. Para el caso del carbono (Figura 3) sin

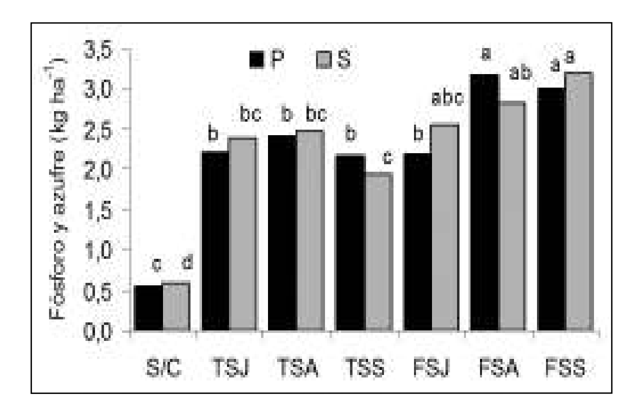


Figura 5. Contenido de P y S en S/C: sin cultivo de cobertura, TSJ, TSA, TSS: testigo secado en julio, agosto y septiembre respectivamente y FSJ, FSA, FSS: fertilizado secado en julio, agosto y septiembre respectivamente.

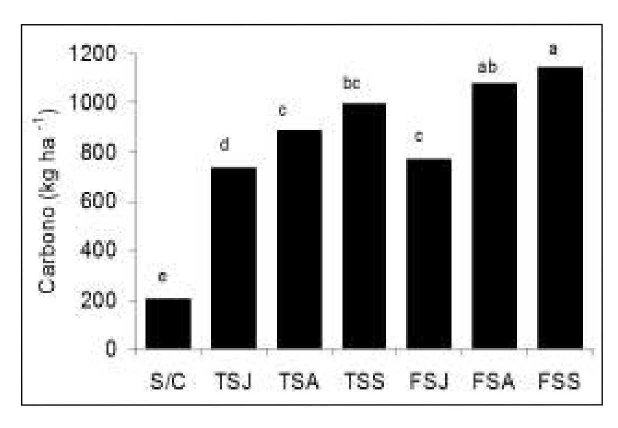


Figura 3. Contenido de carbono en S/C: sin cultivo de cobertura, TSJ, TSA, TSS: testigo secado en julio, agosto y septiembre respectivamente y FSJ, FSA, FSS: fertilizado secado en julio, agosto y septiembre respectivamente.

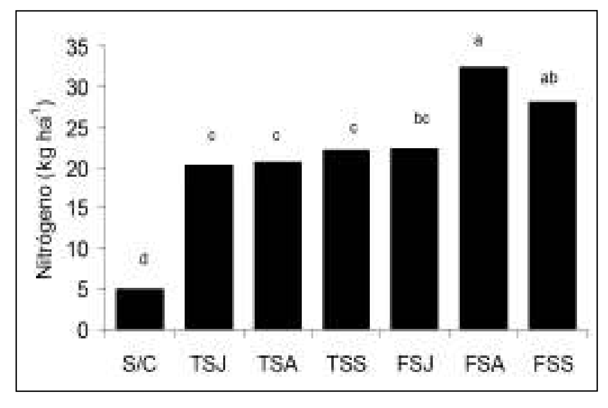


Figura 4. Contenido de N en S/C: sin cultivo de cobertura, TSJ, TSA, TSS: testigo secado en julio, agosto y septiembre respectivamente y FSJ, FSA, FSS: fertilizado secado en julio, agosto y septiembre respectivamente.

cultivos de cobertura (S/C), ingresan 200 kg ha^{-1} al sistema, mientras que estableciendo cultivos de cobertura el aporte de carbono fue significativamente mayor (con un rango entre 737-1141 kg ha^{-1}) y dependió principalmente del momento de secado (cuanto mas tarde, mas carbono) y de la fertilización (fertilizado mas carbono que testigo). Lo mismo ocurre con los contenidos de nitrógeno (Figura 4), P y S (Figura 5). Los contenidos en residuos remanentes de soja son significativamente inferiores (5 kg ha^{-1} de N, 0.5 kg ha^{-1} de P y S) a cuando se incluyó cultivos de cobertura, con contenidos que variaron de acuerdo a la época de secado: N variable entre 20 a 32, P 2.2 a 3.1 y S 1.9 a 3.1 kg ha^{-1}.

Efecto en la disponibilidad de agua

Para evaluar convenientemente la influencia de los cultivos de cobertura sobre la disponibilidad de

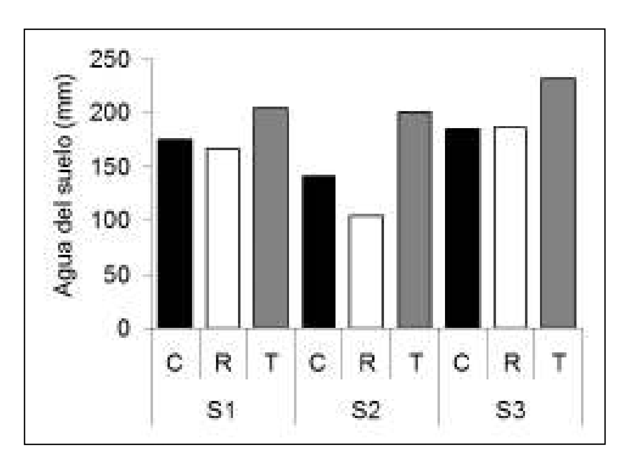


Figura 6. Humedad hasta 1.4 m en tres sitios estudiados, sobre los cultivos de cobertura C: centeno , R: rye grass y T: testigo.

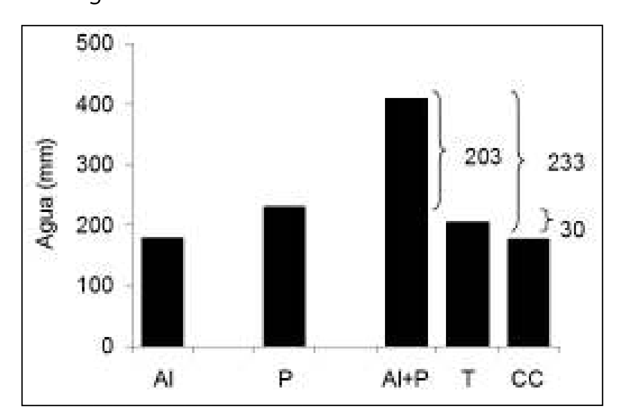


Figura 7. Contenido inicial de agua, precipitaciones y uso consuntivo del cultivo de cobertura en el Sitio 1. AI: agua inicial, P: precipitaciones, T: testigo, CC: cultivo de cobertura.

agua (costo hídrico en la generación de biomasa) resulta necesario considerar la capacidad de almacenaje de agua de los suelos. Este aspecto es particularmente importante ya que define de alguna manera el periodo necesario para la recarga del perfil (fin del cultivo de cobertura). Por ejemplo, en el área de estudio, la capacidad de almacenaje de agua (mm/100 cm) varía entre 70 y 130 mm, y consecuentemente el periodo de recarga de ambos suelos sería distinto. Por lo tanto, puede inferirse que el momento más apropiado para cortar el uso consuntivo del cultivos de cobertura y posibilitar la recarga del perfil también es variable. Además otro de los factores que incide en la recarga de los perfiles es la fecha de siembra, por ejemplo para siembras de maíz (principios octubre) los cultivos de cobertura deberían finalizar la extracción de agua en la primera quincena de julio, mientras que para siembras de soja (principios noviembre) podrían prolongarse

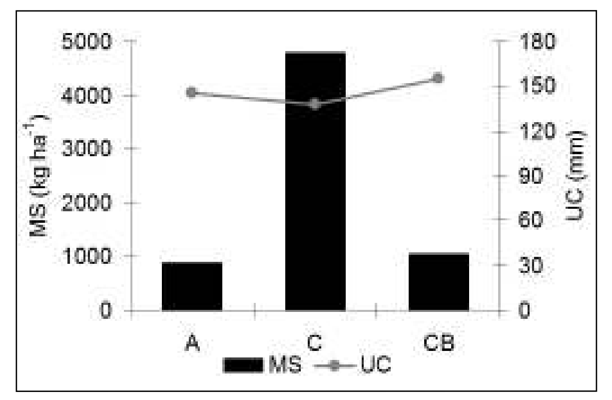


Figura 8. Producción de biomasa (MS) y uso consuntivo (UC) A: avena, C: centeno y CB: cebada.

hasta segunda quincena de agosto. Resultados de experiencias obtenidos en los últimos 5 años muestran que las diferencias en los contenidos finales de agua entre los testigos y los cultivos de cobertura variaron entre 30 y 100 mm (Figura 6). En un análisis preliminar podría concluirse que los cultivos de cobertura tienen un efecto negativo para el cultivo siguiente. Sin embargo, si consideramos que las precipitaciones durante el periodo evaluado fueron de 220 mm, las que sumadas al contenido inicial de agua (190 mm) dan una lámina total de 410 mm, es evidente que la mayor parte de la misma no puede ser almacenada en los primeros 140 cm del perfil. De esta manera se comprueba que el tratamiento testigo finalizó con 207 mm de los 410 mm que potencialmente podría haber almacenado (Figura 7). Es decir que 203 mm no fueron almacenados en el perfil. Por lo tanto, de los 233 mm de uso consuntivo del cultivos de cobertura, 203 mm deben ser descontados y consecuentemente el costo hídrico para el cultivo de verano siguiente resultaría de 30 mm.

En la Figura 8 se observa que el centeno, la avena, y la cebada consumieron aproximadamente 150 mm de agua para producir 4781, 889 y 1027 kg MS ha^{-1} respectivamente. En tal sentido se puede expresar que el centeno fue la especie que utilizó con mayor eficiencia el agua para producir materia seca (35 kg MS mm^{-1}), mientras que la eficiencia para la avena y la cebada fue muy inferior (6.1 y 6.6 kg MS mm^{-1}, respectivamente).

Efecto en la disponibilidad de nitrógeno

La captura de nitratos (NO-3) durante el largo periodo de barbecho que tiene lugar entre cultivos de verano (marzo-octubre) es otro de los objetivos per-

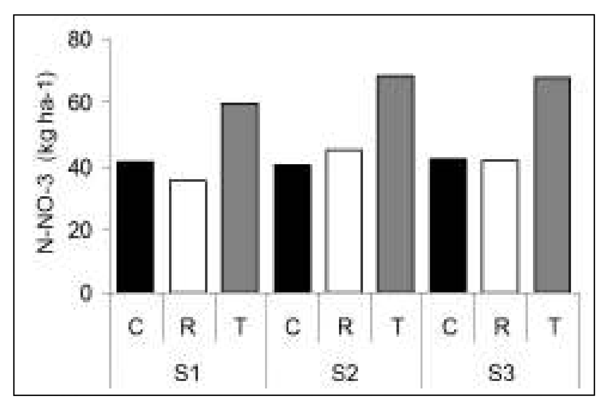


Figura 9. Contenidos de N-NO-3 en tres sitios, al momento de cortar el desarrollo de C: centeno, R: rye grass y T: sin cultivo de cobertura.

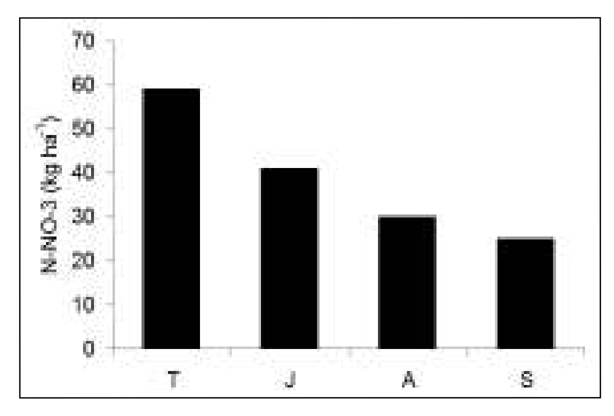


Figura 10. Contenido de N en suelo a la siembra de maíz, en los tratamientos con cultivo de cobertura (centeno) quemado en J: julio, A: agosto y S: septiembre y en el T: testigo.

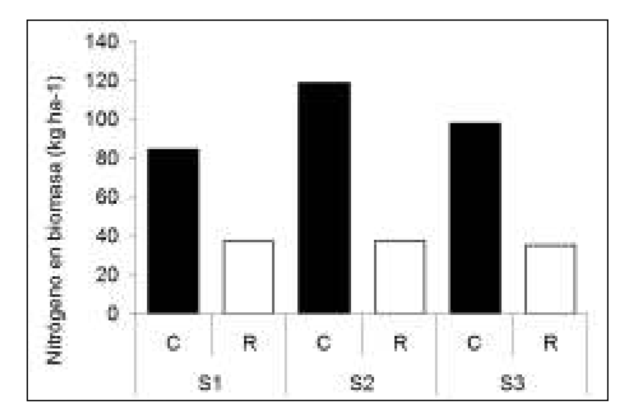


Figura 11. Contenido de nitrógeno en biomasa aérea de los cultivos de cobertura. C: centeno y R: Rye grass.

seguidos al establecer cultivos de cobertura, minimizando la lixiviación durante el otoño, principalmente en suelos arenoso franco y franco arenoso de la Planicie Medanosa. En relación a ello, Nyakatawa et al. (2001) comprobaron sobre un Paleudult Típico entre 23 y 82 % menos de NO-3 bajo cultivos de cobertura que bajo barbecho. Similares resultados fueron obtenidos por Quiroga (1999) quienes trabajando sobre Haplustoles Enticos determinaron entre 70 y 83 % menos de NO-3 bajo verdeo de invierno. Este efecto puede resultar de suma importancia si consideramos que al incrementarse la proporción de residuos con menor relación C/N (soja) puede resultar menor la inmovilización por parte de microorganismos. Al respecto estudios muestran que además de la absorción por parte de los cultivos de cobertura, el contenido de NO-3 también estuvo influenciado por la inmovilización de la fauna microbiana durante etapas tempranas de descomposición de los residuos Sainju et al. (1998).

De las experiencias realizadas sobre Haplustoles Enticos de la Región Semiárida Pampeana se comprueba que los contenidos de N-NO3- resultaron menores (20-30 kg ha^{-1}) en los suelos bajo centeno y rye grass (Figura 9). Al respecto Scianca et al. (2006) comprobaron sobre un Argiudol Típico que no se encontraron diferencias en los contenidos de nitrógeno al finalizar el ciclo de los cultivos de cobertura con respecto al testigo, mientras que en un suelo Hapludol Thapto Árgico las diferencias fueron entre 36 y 41 kg ha^{-1}.

Aunque estas diferencias en el contenido de nitrógeno, se acentúan cuando se atrasa la época de secado de cultivos de cobertura. De la Figura 10 se desprende que el T (testigo) finalizó con 59 kg N ha^{-1}, el suelo con cultivos de cobertura secado en julio (J), agosto (A) y septiembre (S) finalizaron con 41, 30 y 25 kg N ha^{-1} respectivamente. Estos resultados permitirían inferir en primera instancia que los cultivos de cobertura tendrían un efecto perjudicial en los contenidos de N disponible, pero no N total, al finalizar el ciclo del mismo.

No obstante para determinar si el efecto de la inclusión de cultivos de cobertura entre dos cultivos de cosecha es negativo, resulta necesario determinar los contenidos de nitrógeno en biomasa. Por ejemplo el contenido de nitrógeno en biomasa de centenos fue de aproximadamente 90 kg ha^{-1} (Figura 11), mientras que las diferencias finales en los contenidos de N-NO3 en suelo fueron inferiores a 30 kg ha^{-1} (Figura 10). Podría inferirse que parte de esta diferencia de 60 kg de N ha^{-1} a favor del sistema suelo (0-60cm) + cultivos de cobertura, respecto de los testigos corresponden a nitrógeno que fue movilizado a

mayor profundidad por las precipitaciones que no lograron ser almacenadas en el perfil.

La captura de N fue más importante en centenos que en *rye grass*, alcanzando los 100 kg ha^{-1}. Este aspecto resulta relevante considerando la baja capacidad de retención de agua de estos suelos y el alto riesgo de lixiviación durante periodos largos de barbecho.

Descomposicion de cultivos de cobertura en el ciclo del cultivo de verano

Los resultados que se detallan a continuación se encuentran publicados en la revista ciencia del suelo volumen 30 (2), 2012. La relación C/N de los residuos se utiliza para predecir su tasa de descomposición (Ranells y Wagger 1996). De acuerdo a ésta, podrían ocurrir procesos antagónicos, como inmovilización con alta relación C/N o mineralización neta con baja relación C/N. Valores entre 25 y 30 para la relación C/N han sido sugeridos como umbrales entre mineralización neta e inmovilización de N (Allison 1966). Kuo y Jellum (2002) citados por Kramberger et al. (2009), concluyeron que los cultivos de cobertura con especies no leguminosas de alta relación C/N presentaron escaso o nulo aporte de nitrógeno al cultivo sucesor. Con el objetivo de evaluar la descomposición del cultivo de cobertura desde el secado del mismo y durante el ciclo del cultivo de verano se estableció un ensayo en la EEA INTA Anguil.

El cultivo usado como cultivo de cobertura fue centeno (Secale cereale variedad Quehué) el cual fue sembrado el día 16/3/09, a una densidad de 200 plantas m^{-2}. Se utilizó un diseño experimental con tres bloques aleatorizados. En cada bloque se establecieron 2 tratamientos en parcelas de 10 x 15 m. Los tratamientos consistieron centeno testigo (CT) y fertilizado (CF) con 46 kg ha^{-1} de nitrógeno como urea aplicada al voleo a la siembra. El secado se realizó con glifosato a razón de 3 l ha^{-1} en julio (J) (21/7/09) cuando el centeno se encontraba en fines de macollaje y en agosto (A) en estado de encañazon. Al momento de secado del cultivo de cobertura en todos los tratamientos se determinó el peso seco de la biomasa aérea mediante cortes al ras del suelo de una superficie de 0,25 m^2.

Sobre las parcelas de fecha de secado de julio del cultivo de cobertura, en todos los tratamientos, se sembraron maíz y sorgo el día 30/11/2009 a una distancia de 0,52 m entre surcos, y a una densidad de 53000 plantas ha^{-1} y 140000 plantas ha^{-1}, respectivamente. Tanto en maíz como en sorgo se muestreó el residuo (del cultivo de cobertura) en la superficie del suelo mediante recolección del material en una superficie de 0,25 m^2, a la siembra, floración y cosecha de los cultivos de verano. Las muestras de materia seca de los cultivos de cobertura como también de los residuos fueron analizados por sus contenidos de C, N y P.

Los resultados muestran que la fertilización nitrogenada y el momento de secado influyeron sobre la producción de biomasa (Fernández et al. 2010) y sobre la descomposición de los residuos de cultivos de cobertura durante el barbecho y durante el desarrollo del cultivo posterior. Por un lado, la fertilización aumentó la cantidad de residuos y por otro lado, afectó la relación C/N de ellos. En las condiciones del presente estudio, la relación C/N dependió más del momento de secado que de la fertilización nitrogenada (Tabla 2). La fecha temprana de secado (J) produjo residuos con una relación C/N más baja que el secado postergado en agosto. Esto podría asociarse al estado fenológico del centeno en ambas fechas. El cultivo de cobertura secado en J se encontraba en estado vegetativo (macollaje), mientras que el cultivo de cobertura secado en A ya había iniciado la etapa reproductiva y se encontraba en encañazón- floración. Esta diferencia en el estado fenológico podría haber causado una menor concentración de nitrógeno en tallos y hojas en el cultivo de cobertura secado en A debido a la translocación de nitrógeno hacia los órganos reproductivos.

Tabla 2. Relación C/N de la materia seca en los dos momentos de secado del cultivo de cobertura a la siembra, floración y cosecha del cultivo de verano (CV). CTJ: cultivo de cobertura testigo secado en julio, CFJ: cultivo de cobertura fertilizado secado en julio, CTA: cultivo de cobertura testigo secado en agosto, CFA: cultivo de cobertura fertilizado secado en agosto.

Letras diferentes en cada línea indican diferencias significativas.

	CTJ	CFJ	CTA	CFA
Secado de CC	17.3 b	16.2 b	29.2 a	26.9 a
Siembra CV	25 b	24 b	40 a	40 a
Floración CV	32 a	27 a	s/d	s/d
Cosecha CV	32 a	33 a	s/d	s/d

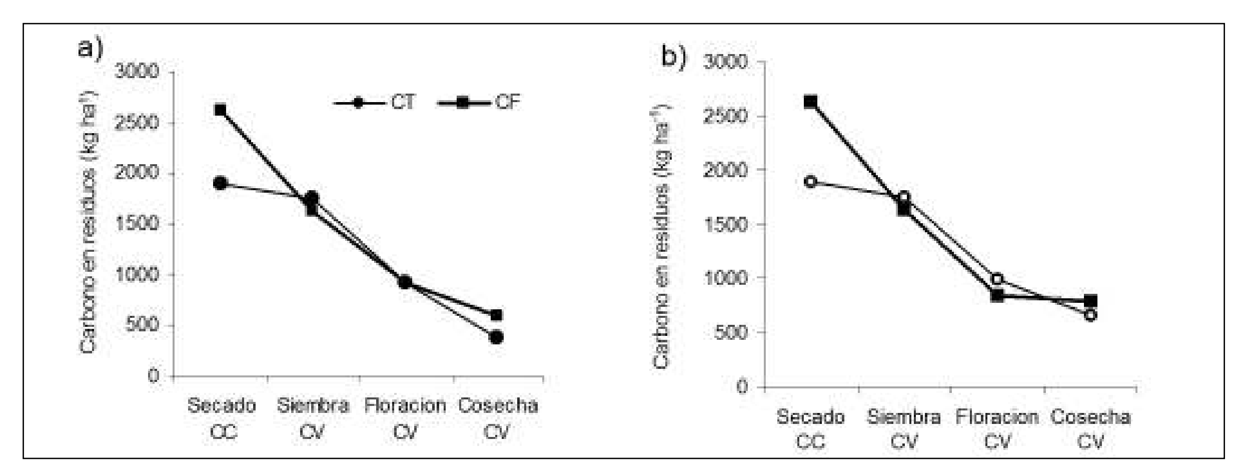


Figura 12. Carbono en residuos de cultivo de cobertura secado en julio, sin fertilizar (CT) y fertilizado con nitrógeno (CF) al momento del secado del cultivo de cobertura, a la siembra, floración y cosecha del cultivo de verano (CV). En cultivo de maíz a) y sorgo b).

El efecto del momento de secado se mantuvo en los residuos de los cultivos de cobertura durante el ciclo de cultivo de verano, ya que los tratamientos J mantuvieron C/N más bajas que los tratamientos A hasta la fecha de siembra de los cultivos de verano. También se observó una diferencia en cuanto al cambio de esta relación en el período de secado de los cultivos de cobertura y siembra de cultivos de verano, ya que el aumento fue menor en los tratamientos secados tempranamente (Tabla 2). Estos aumentos de la relación C/N indicarían que la mineralización de los cultivos de cobertura habría liberado mayor proporción de nitrógeno que de carbono. La pérdida relativa de nitrógeno con respecto al carbono en los residuos de los cultivos de cobertura siguió durante el ciclo del cultivo de verano, aunque con tendencia a estabilizarse en un valor de C/N cercano a 30.

La evolución de C de los residuos de los cultivos de cobertura (Figura 12 a y b) muestra que en el período entre el secado del cultivo de cobertura en julio y cosecha del cultivo de verano hubo importantes pérdidas. En el tratamiento CT, del total de carbono contenido en los residuos se perdieron 1508 kg ha^{-1} y 1234 kg ha^{-1} para el cultivo de maíz y sorgo respectivamente, lo que representa la pérdida del 80 % del total de carbono de los residuos en el caso de maíz y del 65 % en sorgo. Para el tratamiento CF, del total de carbono de los residuos se perdieron 2024 kg ha^{-1} y 1839 kg ha^{-1} para el cultivo de maíz y sorgo respectivamente, lo que representa el 77 % de pérdida en el caso de maíz y 70 % en sorgo. Estos resultados indicarían que la mayor proporción de los residuos de los cultivos de cobertura se mineralizarían en un plazo corto durante el ciclo de un cultivo estival.

Los contenidos de N en la biomasa en julio (CT y CF) fueron 109 y 143 kg ha^{-1} respectivamente y respondieron a la fertilización sobre todo en J. Kramberger et al. (2009), encontraron similares valores de entre 51,3 a 111,4 kg ha^{-1} de nitrógeno en la biomasa de los cultivos de cobertura de gramíneas. Desde el secado de julio de los cultivos de cobertura hasta la fecha de siembra del cultivo de verano, hubo una disminución importante en los contenidos de N en los residuos respecto al contenido inicial (Figura 13). Esta disminución significó 40 y 82 kg ha^{-1} de nitrógeno en CT y CF, respectivamente. Desde siembra a floración del cultivo de verano, el contenido de N en los residuos disminuyó en 40 kg ha^{-1} y 38 kg ha^{-1} de nitrógeno en maíz y sorgo, respectivamente y en CF, 27 kg ha^{-1} y 30 kg ha^{-1} en maíz y sorgo respectivamente. De floración a cosecha en CT la diferencia en maíz fue de 17 kg N ha^{-1} y en sorgo 10 kg N ha^{-1} y en CF 15 y 7 kg N ha^{-1} para maíz y sorgo respectivamente. En los 10 meses entre el secado del cultivos de cobertura y cosecha del cultivo de verano (julio a mayo,) la pérdida en el contenido de N de los residuos correspondió a 97 y 88 kg ha^{-1} en CT para maíz y sorgo respectivamente y en CF 123 y 119 kg ha^{-1} para maíz y sorgo respectivamente. Estos resultados indicarían que la mineralización de los residuos de los cultivos de cobertura aportaría importantes cantidades de N al suelo durante el barbecho y el ciclo de los cultivos de verano. Estos resultados concuerdan con Wagger (1989) quien encontró que después de 8 semanas del secado de los cultivos de cobertura, el 50 % del N proveniente de un centeno fue liberado.

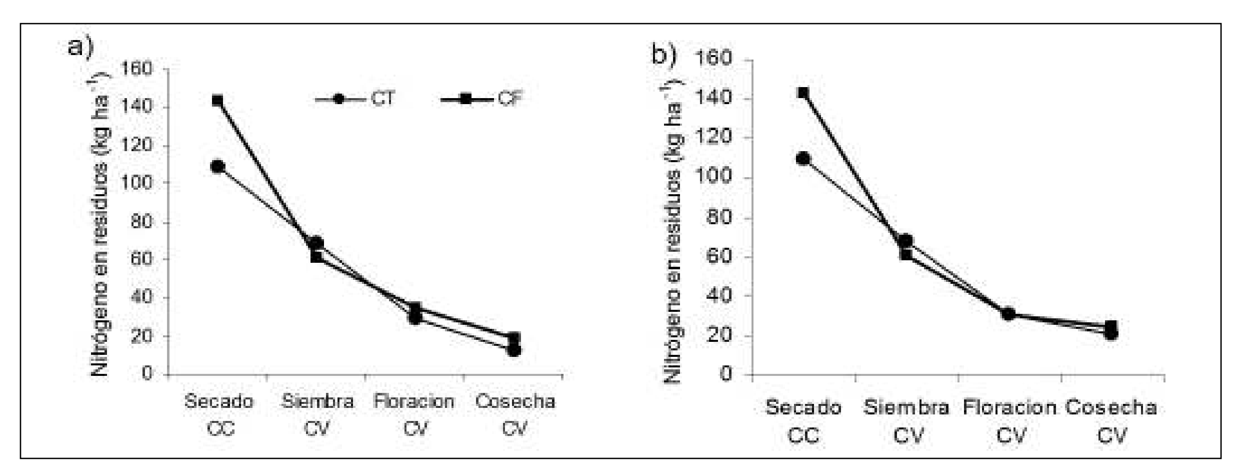


Figura 13. Nitrógeno en residuos de cultivo de cobertura secado en julio, sin fertilizar (CT) y fertilizado con N (CF) al momento del secado del cultivo de cobertura, a la siembra, floración y cosecha del cultivo de verano (CV). En cultivo de maíz a) y sorgo b).

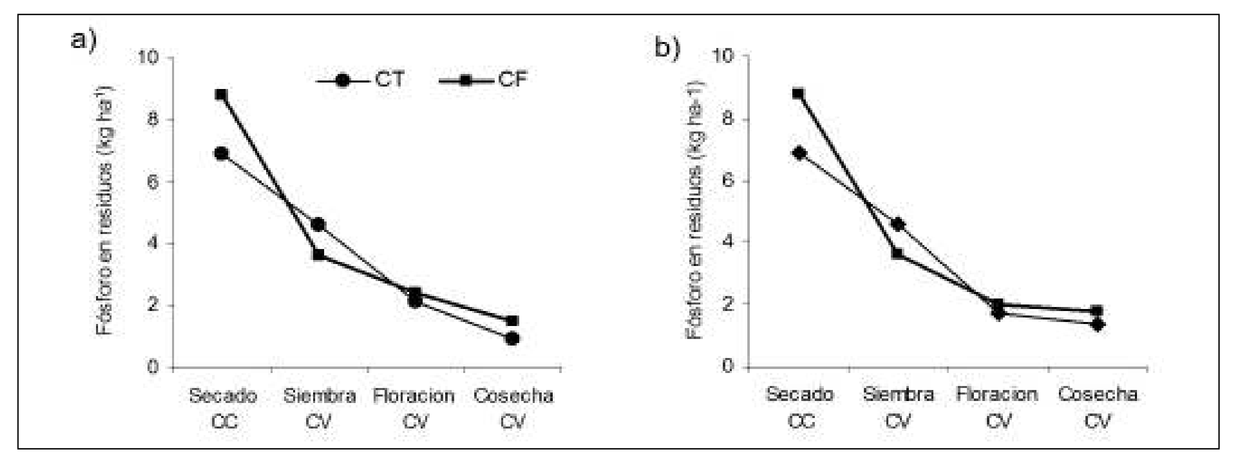


Figura 14. Fósforo en residuos de cultivo de cobertura secado en julio, sin fertilizar (CT) y fertilizado con N (CF) al momento del secado del cultivo de cobertura, a la siembra, floración y cosecha del cultivo de verano (CV). En cultivo de maíz a) y sorgo b).

Los residuos provenientes de CF se mineralizaron más rápidamente, ya que a la siembra del cultivo de verano habían perdido el 58% de nitrógeno (82 kg ha^{-1}), versus el 36% (40 kg ha^{-1}) en CT. En general, la tendencia en CT fue de una tasa más uniforme de pérdida de nitrógeno, mientras que en CF la tasa inicial entre secado de los cultivos de cobertura y siembra del cultivos de verano fue muy alta y luego disminuyó a una tasa similar a la tasa de pérdida del CT. La alta tasa de pérdida de N en CF antes de la siembra del cultivo de verano reflejaría una mayor tasa de mineralización de los residuos provenientes de CF debido a su menor relación C/N. Esta alta tasa en el período de barbecho antes de la siembra del cultivo de verano implicaría que el N mineralizado se podría perder por lixiviación y no estaría disponible para el cultivo sucesor. Este fenómeno refleja la dificultad de sincronizar la oferta de N por la mineralización de los residuos de los cultivos de cobertura con los requerimientos del cultivo sucesor, tal como ya lo han señalado Ranells y Wagger (1996). Algunos de los factores que inciden sobre la tasa de mineralización de los residuos se pueden manejar, tales como la relación C/N a través de la fertilización o la fecha de secado del cultivos de cobertura, mientras que otros factores, sobre todo las condiciones de temperatura y de humedad, son condicionantes y muchas veces imprevisibles.

Con respecto al P los valores iniciales en los residuos de los cultivos de cobertura fueron de 6.8 a 8.8 kg ha^{-1} para el tratamiento CT y CF respectivamente. Desde el secado de los cultivos de cobertura hasta la fecha de siembra del maíz (Figura 14 a) y sorgo (Figura

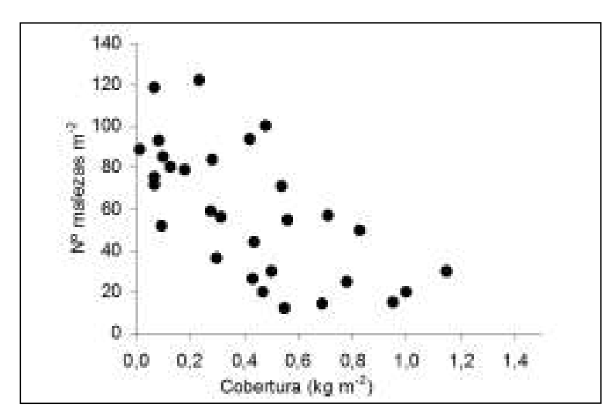


Figura 15. Número de malezas en función a la cobertura del suelo.

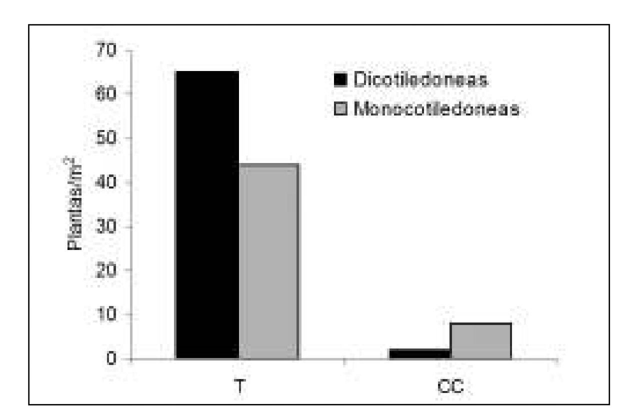


Figura 16. Cantidad de malezas dicotiledóneas y monocotiledóneas en T: testigo y cultivo de cobertura.

14 b), el cultivo de cobertura perdió 2.3 y 5.2 kg ha^{-1} P en CT y CF respectivamente. Desde la fecha de siembra del maíz a floración, las pérdidas fueron de 2.5 kg ha^{-1} y 1.2 kg ha^{-1} CT y CF respectivamente y en sorgo para CT 2.9 kg ha^{-1} y en CF 1.6 kg ha^{-1}. De floración a cosecha en CT se perdieron en el maíz 1.2 kg P ha^{-1} y en CF 0.9 kg P ha^{-1}, mientras que en sorgo en CT estas pérdidas fueron de 0.3 kg ha^{-1} y en CF 0.2 kg ha^{-1}. Las diferencias registradas desde julio a mayo fueron del 84 y 86 % tanto para CT y CF respectivamente.

Los datos de la evolución de los residuos de los cultivos de cobertura muestran que tanto para el carbono como para el nitrógeno y el fósforo la tasa de pérdida desde los cultivos de cobertura es mayor en la primera etapa entre el secado a siembra del cultivo de verano. También es en esta etapa donde se observan las mayores diferencias entre CT y CF, con elevadas tasas de mineralización en CF respecto de CT. Esto podría explicarse por la menor relación C/N en los residuos de CF en el momento del secado del CC (Tabla 2) la cual favorecería la descomposición más rápida de los residuos.

Efecto en las malezas

En diferentes estudios (Scianca et al. 2006, Liebman y Davis 2000) se han comprobado que la cobertura puede reducir la densidad y biomasa de malezas en sistemas de siembra directa. En relación a lo expuesto se puede observar en la Figura 15 que la cobertura del suelo condicionó negativamente la cantidad de malezas, limitando la emergencia de las mismas (Mholer 1996).

Los cultivos de cobertura, modifican tanto la diversidad de especies como la frecuencia de las mismas, en tal sentido en la Figura 16 se observa que la cantidad de malezas (monocotiledóneas y dicotiledóneas) fue mayor en el tratamiento T. Estos datos coinciden con los encontrados por Rufo (2003); Abdin et al. (2000). En distintos estudios de tesis de postgrado que se están conduciendo en la Región Semiárida Pampeana se ha comprobado una influencia significativa de la inclusión de cultivos de cobertura sobre la población de malezas, reduciéndose el uso de herbicidas. Este tema requiere de un mayor desarrollo para ajustar la tecnología a distintas condiciones de sitio.

Efectos sobre el rendimiento de maíz y sorgo

Establecidos los cultivos de cobertura versus la opción de no realizarlos, se están evaluando los efectos sobre la producción de los cultivos sucesores. A continuación se muestran los resultados en

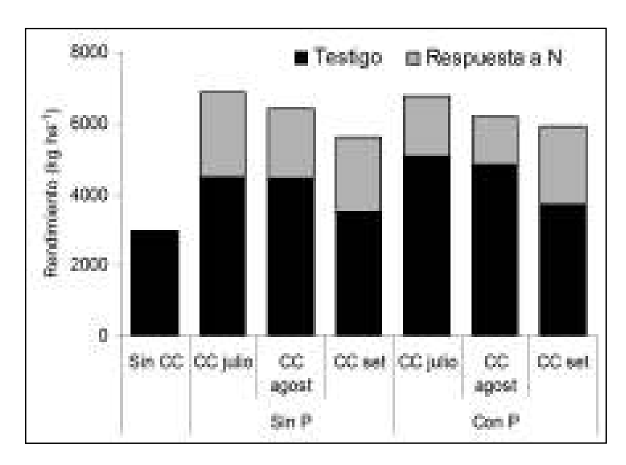


Figura 17. Rendimiento de maíz y respuesta a la fertilización con N; en tratamientos sin CC: cultivo de cobertura, CC julio, CC agosto, CC set: cultivo de cobertura secado en julio, agosto septiembre; sin y con P: sin y con fertilización fosforada.

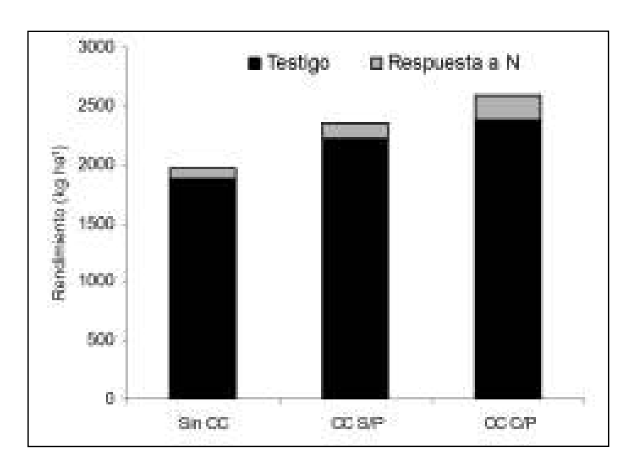


Figura 18. Rendimiento de sorgo en testigo y respuesta a la fertilización nitrogenada en Sin CC: sin cultivo de cobertura, CC S/P, CC C/P: cultivo de cobertura sin y con fertilización fosforada.

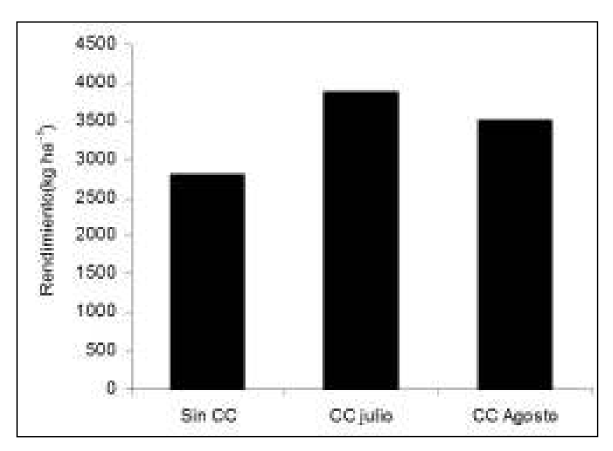


Figura 19. Rendimiento de soja en tratamientos sin CC: cultivo de cobertura, CC julio: cultivo de cobertura secado en fines de julio, CC agosto: cultivo de cobertura secado en agosto.

maíz (Figura 17) y en sorgo (Figura 18), donde en ambos casos se observa una influencia positiva de una mayor cobertura del suelo sobre el rendimiento. Para el caso del maíz (Figura 17) el rendimiento sin haber establecido previamente el cultivo de cobertura fue 2990 kg ha^{-1}, mientras que el rendimiento promedio de los tratamientos con CC, sin fósforo y sin N fue 4152 kg ha^{-1} y con P y sin N 4530 kg ha^{-1}. Además la respuesta promedio a la fertilización nitrogenada en el tratamiento con cultivo de cobertura sin P fue 2155 y con P 1742. De la Figura se desprende que los mayores rendimientos se obtuvieron cuando el maíz fue establecido sobre cultivos de cobertura secado en julio.

Para el sorgo (Figura 18) el rendimiento sin haber establecido previamente el cultivo de cobertura fue de 1872 kg ha^{-1}, mientras que con cultivos de cobertura fue de 2225 kg ha^{-1}. También se corroboraron resultados similares para el cultivo de soja, donde la inclusión del cultivo de cobertura secado en julio permitió producir 1074 kg ha^{-1} más que sin cultivo de cobertura (Figura 19). El tratamiento cultivo de cobertura secado en septiembre produjo 721 kg ha^{-1} mas que su par sin cultivo de cobertura. Si bien estos resultados son preliminares, puede inferirse que la influencia de la cobertura durante el desarrollo de los cultivos condicionaría una mayor relación transpiración/evaporación, posibilitando una mayor eficiencia de uso de agua. La respuesta a la fertilización resultaría dependiente de esta influencia, si se observan las tendencias a una mayor respuesta a N cuando se fertilizó con P y además se estableció cultivo de cobertura.

Por lo expuesto, se considera significativa la contribución de los cultivos de cobertura en la eficiencia de uso del agua pluvial y/o de riego. Los cultivos de cobertura fueron eficientes en la acumulación de biomasa y en el secuestro de N y P. La mineralización de los residuos de los cultivos de cobertura ocurrió en un 65 a 80 % entre la fecha de secado de los cultivos de cobertura y la cosecha del cultivo de verano, con tasa iniciales mayores en los tratamientos fertilizados. Esto resultó en importantes aportes de N y P al cultivo de verano. La mayor tasa de pérdida ya sea de C, N y P ocurrió entre el secado del cultivo de cobertura a la siembra del cultivo de verano, etapa donde no existe importante demanda por parte del cultivo de verano. Futuros estudios serían necesarios establecer, para tratar de sincronizar la oferta por parte de los residuos del cultivo de cobertura al momento de mayor demanda del cultivo de verano.

Bibliografía

- Allison, F. 1966. The fate of nitrogen applied to soils. Adv. Agron. 18:219-258.
- Alvarez C, M. Barraco, M. Díaz-Zorita y C. Scianca. 2006. Uso de cultivos de cobertura en rotaciones con base soja: efecto sobre algunas propiedades edáficas y rendimiento de los cultivos en un Hapludol típico del noroeste bonaerense. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Pag 424
- Daliparthy J., S. Herbert y P. Veneman. 1994. Dairy manure application to alfalfa: crop response, soil nitrate, and nitrate in soil water. Agron. J. 86, 927– 933.

• Ding G., X. Liu, S. Herbert, J. Novak, A. Dula y B. Xing. 2005. Effect of cover crop management on soil organic matter. Geoderma. Article in Press.
• Duarte G. 2002. Sistemas de Producción de girasol en la región húmedad argentina. In Manual práctico para el cultivo de girasol. Ed Díaz-Zorita M. y Duarte G. 2002. 313 pp.
• Fernández R, J. Saks, J. Arguello, A. Quiroga y E. Noellemeyer. 2010. Cultivo de cobertura, ¿una alternativa viable para la Región Semiárida Pampeana? Congreso ISTRO. Uruguay.
• Garnero G. y A. Quiroga. 2003. Caracterización de ambientes para el cultivo de soja y la influencia de la napa de agua. En Cultivos de Cosecha Gruesa, EEA INTA Anguil, Bol. Div. Tec. 77.
• Kramberger B., A. Gselman, M. Janzekovic, M. Kaligaric y B. Bracko. 2009. Effects of cover crops on soil mineral nitrogen and on the yield and nitrogen content of maize. Europ J. Agronomy 31: 103-109.
• Liebman M., A. Davis. 2000. Integration of soil crop and weed management in low external imout farning systems. En: Weed Res. 40, pp. 27-47
• Mohler Chl. 1996. Ecological bases for cultural control annual weeds. J. Prod. Agric. 9: 468-474.
• Nyakatawaa E, K. Reddya y K. Sistani. 2001. Tillage, cover cropping, and poultry litter effects on selected soil chemical properties. Soil. Till. Res. 58, 69-79.
• Quiroga A., D. Fernández, O. Ormeño, J. Ventura. 1999. Efectos del manejo (rotación-agricultura) sobre los contenidos de materia orgánica, nitrógeno y fósforo en suelos de la región semiárida pampeana. Boletín Técnico Nº 63 EEA Anguil.
• Ranells N. y M. Wagger. 1996. Nitrogen release from grass and legume cover crop monocultures and bicultures. Agron. J. 88, 777–782.
• Ruffo M. 2003. Factibilidad de inclusión de cultivos de cobertura en Argentina. Actas XI Congreso de AAPRESID I: 171-176.
• Sainju U., B. Singh y W. Whitehead. 1998. Cover crop root distribution and its effects on soil nitrogen cycling. Agron. J. 90, 511±518.
• Scianca C., C. Álvarez , M. Barraco, A. Quiroga y P. Zalba.. 2006. Cultivos de cobertura. Aporte de carbono e influencia sobre propiedades edáficas. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Pag 369.
• Wagger M. 1989.Cover crop management and nitrogen rate in relation to growth and yield of no-till Corn. Agron. J. 81:533-53
• Wander M. y S. Traina. 1996. Organic fractions from organically and conventionally managed soils: I. Carbon and nitrogen distribution. Soil Sci. Soc. Am. J. 60, 1081– 1087.

Matías Saks, Romina Fernández y Alberto Quiroga

Contribución de las napas al rendimiento de maíz y soja en molisoles de la planicie medanosa

Las napas pueden contribuir significativamente al uso consuntivo con valores que pueden alcanzar el 70% del total de agua evapotranspirada (Sepaskhah et al. 2003). Al respecto, Kahlown et al. (2005), indicaron que la capa freática contribuye en un 40% del total de agua edáfica requerida por maíz cuando la misma se encuentra a una profundidad de 50 cm. Mueller et al. (2005) comprobaron para maíz consumos de 100 a 400 mm cuando la napa se encontraba entre 80 y 120 cm de profundidad, produciendo aumentos de producción. Garnero y Quiroga (2003), indicaron que la profundidad efectiva de la napa, durante el período crítico de los cultivos de soja, condicionó de manera diferencial el rendimiento en Molisoles de la Región Semiárida Pampeana (RSP). En estudios realizados en la Pampa Ondulada, Portela et al. (2009) comprobaron a través de una toposecuencia cultivada que las posiciones bajas del paisaje pueden contribuir al intercambio de agua y nitrógeno (N) con el suelo cuando la napa se encuentra a menos de 2,5 m de profundidad. El espesor de suelo explorado por las raíces es otra de las variables que condiciona la biodisponibilidad de agua (Kramer 1983) y el rendimiento de los cultivos. Bajo estas condiciones surgen dos variables de importancia para caracterizar el efecto de la disponibilidad de agua que son la profundidad efectiva de raíces y el límite inferior de agua extractable alcanzado (Dardanelli y Bachmeier 1993). El cultivo de maíz alcanza una profundidad máxima de raíces de 2 m al comienzo del período de llenado de granos (Dardanelli et al. 1997), distribuyéndose el 90% de la masa radical en los primeros 30 cm del suelo (Andrade et al.1996). En relación con la profundidad efectiva se ha comprobado que la misma puede variar significativamente como consecuencia de deficiencias hídricas tempranas (Otegui 1992; Pandey et al. 2000) y debido también a diferencias genotípicas (Lorens et al. 1987; Eghball y Maranville 1993, Ray et al. 1997). El período de floración es crítico para la determinación del rendimiento de grano de maíz (Otegui et al. 1995; Andrade 1995). Teniendo en cuenta esto último, el estrés hídrico o deficiencias de nitrógeno pueden inducir pérdidas en el número de granos asociadas a la fotosíntesis o al crecimiento de la planta en floración (Uhart y Andrade 1995).

Ambientes con influencia de napa freática

El agua subterránea puede estar totalmente desacoplada de la vegetación o interactuar con ella como un aporte adicional de agua y nutrientes o un factor de estrés por anegamiento y/o salinidad. La potencialidad de este aporte depende del balance entre la precipitación y la evapotranspiración del cultivo, de la salinidad del agua freática (restringiendo su posible absorción), de la textura del suelo (condicionando su capacidad de transporte de agua desde la zona saturada) y de algunas características de los cultivos (profundidad y distribución de las raíces, tolerancia a la salinidad y anegamiento); es por ello que debe analizarse en distintos ambientes productivos (AEGA-224032).

a) Experiencias en soja

Durante la campaña 2002/03 se establecieron experiencias tendientes a evaluar el efecto de la napa de agua en el cultivo de soja, en el área de influencia de Hilario Lagos (Garnero y Quiroga 2003). A continuación se detallan los cuatro sitios seleccionados para la realización de las experiencias: Establecimiento La Empacada: 10 años de agricultura permanente, con una rotación de girasol, soja, trigo en labranza convencional; Productores Asociados: 7 años en siembra directa, con rotación de cultivos anuales (trigo, maíz, avena semilla, soja, soja, centeno semilla, girasol), Campo Signorile: se caracteriza por tener una historia de pastura de 7 años y luego soja directa; La voluntad: se caracteriza por ser una lomada arenosa plana, sin influencia de la napa de agua, en los primeros 200 cm de profundidad. Con ocho años de agricultura permanente.

Profundidad de la napa de agua	12/10/02	22/10/02	29/10/02	11/11/02	30/01/03	13/03/03
Productores Asociados	175cm	110cm	80cm	107cm	127 cm	165 cm
La Voluntad	180cm	180cm	180cm	180cm	180 cm	180 cm
La Empacada	180cm	150cm	105cm	178cm	180 cm	180 cm
Campo Signorile	180cm	110cm	130cm	96cm	137 cm	155 cm

Tabla 1. Variación de la profundidad de la napa de agua durante el cultivo.

Cuando se expresa 180 cm, significa que el nivel de agua no se hallo a esa profundidad.

Prof.(cm)	Humedad (mm) 25/10				Humedad (mm) 19/11			
	LV	LE	S	PA	LV	LE	S	PA
0-20	29.9	40	54	46	9	35	52	41
20-40	24.4	39	64	55	19	30	62	46
40-60	23.5	43	68	63	21	33	67	55
60-80	23.5	67	74	58	21	38	63	59
80-100	24.6	72	69	56	20	52	58	56
100-120	23.3	76	79	69	20	63	58	58
120-140	23.7	77	73	51	20	66	51	54
Total	172.9	414	481	398	130	317	411	369
PMP	110	180	160	150	110	180	160	150
AU	62.9	234	321	248	20	137	251	219

Tabla 2. Contenidos de agua total y agua útil (AU) en los cuatro sitios evaluados. LV: La Voluntad; LE: La Empacada; S: Campo Signorile y PA: Productores Asociados.

Sitios	Frente humedad	Napa	Rendimiento
La Voluntad	+ de 250	+ de 250	215
La Empacada	97	204	974
Signorile	60	137	3235
Prod.Asociados	47	127	3226

Tabla 3. Frente de humedad (posible efecto capilaridad) y profundidad de la napa freática (cm), registrado en el mes de enero en los cuatro sitios. Rendimiento de grano (kgha^{-1}).

En todos los sitios se utilizó la misma variedad (DM 4800) y la misma fecha de siembra (entre el 1 y 2/10) para minimizar el posible efecto de ambos factores. Se realizó barbecho químico (2 litros de glifosato + 0,005 gramos de metsulfuron) y en presiembra (1,5 kg de glifosato + 150 cipermetrina). Se sembraron 20 semillas por metro lineal a 35 cm entre surco con una sembradora Erca de 10 surcos. La semilla fue curada e inoculada con la combinación de carbendazim + tirad + inoculante líquido.

En cada sitio se instalaron freatímetros para medir la profundidad de la napa y obtener muestras de la misma a fin de cuantificar el contenido de sulfatos. En capas de 20 cm y hasta 140 cm de profundidad, se determino el contenido de agua total y útil en el suelo.

En la Tabla 1 se muestra la importante diferencia entre sitios en cuanto a la profundidad de la napa, especialmente durante el periodo de mayores requerimientos del cultivo. El contenido inicial de agua participa significativamente en el uso consuntivo de los cultivos y puede ser determinante en muchos casos del rendimiento de los mismos. La Tabla 2 muestra una situación crítica para el cultivo de soja establecido en La Voluntad, sitio que posee bajo contenido inicial de agua útil y no cuenta con aporte de la napa. En la Tabla 3 se muestran resultados de la profundidad de la napa y del frente de humedad durante el periodo de mayor uso consuntivo del cultivo.

Sobre el antecesor pastura se registraron los mayores contenidos de N de nitratos (87 kg ha^{-1} de 0-60cm) y de sulfatos en la napa (Tabla 4). Estos resultados pueden ser importantes en la medida que nuevos estudios confirmen esta importante influencia del antecesor pastura sobre la disponibilidad de nutrien-

Sitios	pH en Agua	pH en Cl K	$N\text{-}NO_3$ (25/10) kg ha^{-1}	Sulfatos en napa (kg ha^{-1})
La Voluntad	5,6	5,2	42	
La Empacada	5,8	5,6	55	5 *
Signorile	5,5	5,5	87	106
Prod.Asociados	5,8	5,6	38	8

Tabla 4. pH, contenidos de nitratos en suelo y sulfatos en napa (primeros 40 cm de la napa).

tes. Los valores de pH pueden ser considerados bajos para soja, especialmente en La Voluntad, donde además el pH potencial alcanza valores de 5,2.

b) Experiencias en maíz

Profundidad y abundancia de raíces

Durante la campaña 2010/11 sobre un suelo Ustisament en el campo de la EEA INTA Anguil se estableció un ensayo de fertilización en el cultivo de maíz con el objetivo de evaluar la interacción entre el genotipo y la fertilización nitrogenada sobre los componentes del rendimiento y abundancia de raíces en maíz. Los tratamientos fueron dispuestos en un diseño factorial (2x2) con bloques completamente aleatorizados con cuatro repeticiones. Los factores analizados fueron: F1. Genotipo: Ciclo Corto (Pioneer 39B77); Ciclo Largo (Pioneer 2069 Y) y F2. Fertilización nitrogenada: N0= sin fertilización; N200= 200 kg de N ha^{-1}.

La fertilización nitrogenada no incremento la abundancia de raíces de los distintos genotipos (p=0.5).

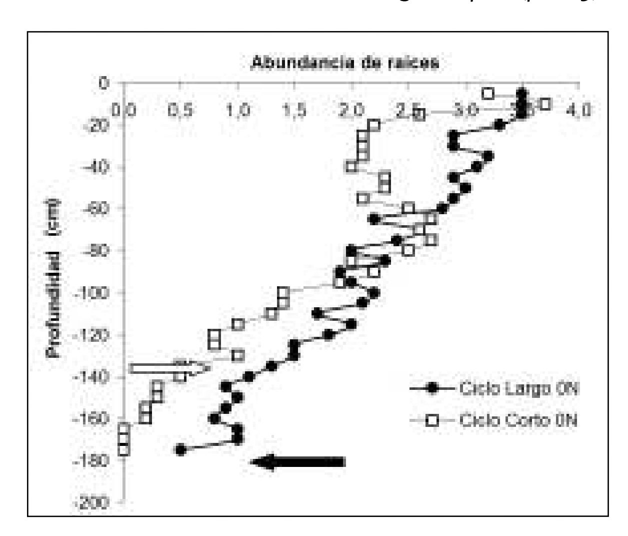


Figura 1. Abundancia promedio de raíces para el genotipo ciclo corto y ciclo largo en función de la profundidad de suelo.

Sin embargo, entre genotipos se registraron diferencias significativas para la variable abundancia (p=0.002) y profundidad de raíces ($p<0.0001$) registrándose raíces a mayor profundidad en el genotipo ciclo largo (180 cm) respecto al ciclo corto (130 cm). Observaciones similares fueron descriptas por Gaggioli et al. (2010), registrando mayor abundancia y profundidad de raíces en híbridos de ciclo de crecimiento más largo. La mayor abundancia y profundidad de raíces observada en el genotipo ciclo largo, permitiría inferir que los mayores niveles de rendimiento y respuesta a la fertilización podrían estar asociados a un mayor consumo y captura de agua por parte del cultivo respecto a los genotipos ciclo corto (Figura 1).

Estos resultados permiten inferir que la profundidad de raíces es un factor a considerar para incrementar la biodisponibilidad de agua para los cultivos, resultando importante al momento de elaborar estrategias de manejo que permitan incrementar la captación y eficiencia en el uso del agua. Es por ello, que la profundidad de raíces podría incidir en la captura de agua tanto del suelo como de la aportada por la napa freática.

Contribución de las napas

Durante las campañas 2007/08, 2008/09, 2009/10 y 2010/11 se establecieron 22 ensayos de fertilización nitrogenada en maíz en el Este arenoso de La Pampa en sitios con presencia de napa de agua en los primeros 200 cm del perfil y 9 ensayos sin influencia de la napa. Al momento de la siembra se realizaron determinaciones de los contenidos de agua disponible en el suelo y en los sitios con napa se tomaron muestras para determinar contenidos de nutrientes. En la Tabla 5 se presenta una caracterización de las napas comprobándose una importante variación en los contenidos de nutrientes y en parámetros relacionados con la potencial contribución de sales (RAS y conductividad eléctrica).

Tabla 5. Contenido de nutrientes en napas (ppm), pH, RAS y profundidad al momento de la siembra del cultivo de maíz. Campañas 2007 al 2010.

Sitio	pH	C.E. mmohs/cm	B	Na	Mg	P	S ppm	K	Ca	N-NO3	RAS	Prof. cm
							2007/08					
1	8,8	1,7	1,2	346,9	36,0	0,1	20,9	39,2	24,4	8,6	11,2	160
2	8,9	2,7	1,9	665,3	13,4	0,1	45,5	43,9	25,6	6,2	27,0	60
3	8,9	2,4	1,8	609,7	11,0	0,8	40,1	23,1	20,5	8,6	27,2	100
4	9,0	2,8	4,4	647,1	46,0	0,4	108,8	41,4	19,1	3,1	19,1	80
5	8,7	0,9	0,6	56,1	87,8	0,1	3,1	65,2	34,8	3,3	1,2	140
6	8,4	2,1	1,3	378,3	79,2	0,1	97,5	56,5	79,2	4,7	7,2	120
							2008/09					
7	7,3	1,3	1,1	207,0	26,9	0,2	9,2	219,0	37,5	5,6	6,8	260
8	7,7	2,2	2,2	462,0	22,5	0,5	17,8	30,8	10,2	4,4	18,6	220
9	7,8	1,1	0,6	205,7	30,5	0,2	13,0	19,3	23,5	1,5	6,6	200
10	7,2	0,6	0,2	23,1	35,5	0,8	2,7	159,2	51,2	1,3	0,6	280
11	7,5	1,8	1,7	379,5	15,9	0,7	27,4	240,6	14,4	0,6	16,5	200
12	6,9	0,6	0,2	28,8	29,7	0,3	3,3	107,8	47,3	0,7	0,8	260
13	7,2	1,1	0,9	179,1	32,5	0,3	3,6	68,2	29,6	1,0	7,1	280
14	7,4	2,2	1,5	466,0	11,7	1,1	17,4	180,8	15,4	0,5	22,6	200
15	8,0	6,7	4,6	1526,3	22,3	3,0	265,0	265,0	29,6	0,3	52,7	140
							2009/10					
16	8,0	7,9	12,1	1735,0	17,8	4,2	197,5	22,7	11,08	5,0	76,0	180
17	7,7	8,6	8,3	1840,3	44,5	1,9	165,7	62,5	25,0	4,4	51,0	180
18	8,9	5,2	6,4	1943,7	30,8	2,6	188,3	50,2	10,6	7,1	72,4	220
19	8,1	0,5	5,1	36,9	21,4	1,2	1,6	19,8	36,7	4,5	1,2	300
							2010/11					
20	8,3	2,4	2,8	472,0	3,9	4,5	21,0	22,2	12,5	11,0	30,0	160
21	8,4	2,9	2,7	577,0	10,4	3,4	30,1	18,4	15,0	22,4	27,3	180
22	8,2	3,3	3,2	647,7	8,1	1,3	116,7	17,4	12,6	33,1	35,0	220
Promedio	7,8	3,0	3,3	670,6	22,8	1,6	67,5	94,0	23,9	6,5	26,6	188
DE	0,5	2,6	3,3	682,1	11.1	1,5	87,9	89,0	13,5	9,0	24,8	65,5
Max.	9,0	8,6	12,1	1943,7	87,8	4,5	265,0	265,0	79,2	33,1	76,0	300
Min.	6,9	0,5	0,2	23,1	3,9	0,1	1,6	17,4	10,2	0,3	0,6	60

Tabla 6. Propiedades edáficas evaluadas en los 12 sitios con presencia de napas (CN) y sin napa (SN) donde se condujeron los ensayos de fertilización de maíz. MO (materia orgánica).

Sitios	Presencia de napa	Precip. Oct-Feb Historica	2007/08	Tipo de suelo	MO	Arcilla +limo (%)	P disponible (ppm)	Agua útil siembra (mm)	Agua útil floración (mm)	N-NO3 (kg ha^{-1} .60cm)
1	CN	431	454	Hapludol Entico	2,5	31	9,6	274	155	99
2	CN	431	454	Hapludol Entico	1,8	52	10,1	497	395	110
3	CN	449	605	Haplustol Entico	2,2	59	15,6	501	479	103
4	CN	458	395	Haplustol Entico	2,3	35	8,2	338	213	97
5	CN	458	395	Haplustol Entico	1,7	25	9,7	289	127	92
6	CN	458	395	Haplustol Entico	1,6	20	6,3	378	216	101
7	SN	449	605	Haplustol Entico	1,8	22	9,3	141	83	104
8	SN	391	540	Haplustol Entico	2,1	25	9,6	105	41	88
9	SN	391	580	Haplustol Entico	2,0	30	9,3	139	145	105
10	SN	391	580	Haplustol Entico	1,2	18	14,4	96	13	92
11	SN	391	476	Haplustol Entico	1,6	30	7,9	172	103	92
12	SN	449	438	Haplustol Entico	0,7	12	31,2	89	31	86
Prom	**CN**	**448**	**450**		**2,0**	**37**	**9,9**	**380**	**264**	**101**
	SN	**410**	**537**		**1,6**	**23**	**13,6**	**124**	**69**	**94**

La Tabla 6 muestra las propiedades edáficas evaluadas durante la campaña 2007/08 (12 sitios) en donde se observa una amplia variación (89-501 mm) en los contenidos de agua útil a la siembra (AUS) como también en el contenido de agua útil a floración (AUF), donde esta varió entre 13 y 479 mm. En los sitios con napa (CN) el AUS varió entre 289 y 501 mm, mientras que en los sitios sin napa (SN) los contenidos de AUS fueron considerablemente menores (89-172 mm). Similar tendencia se puede observar con el AUF, donde el rango de variación fue entre 127 y 479 mm y entre 13 y 145 mm, en los sitios con y sin napa, respectivamente.

La profundidad del nivel freático al momento de la siembra, floración y cosecha varió entre 60 y 160 cm, entre 140 y 200 y entre 140 y 300 cm respectivamente (Figura 2). Estos resultados coinciden con los registrados por Nosetto et al (2009), quienes observaron incrementos en la profundidad de la napa producida por el consumo de los cultivos.

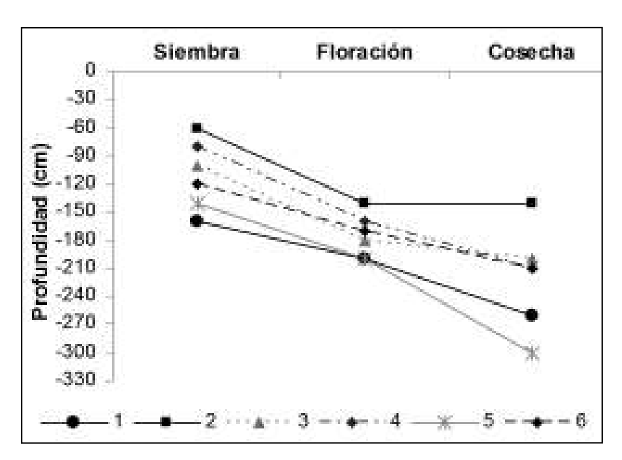


Figura 2. Profundidad del nivel freático en los sitios con presencia de napa durante la siembra, floración y cosecha de maíz.

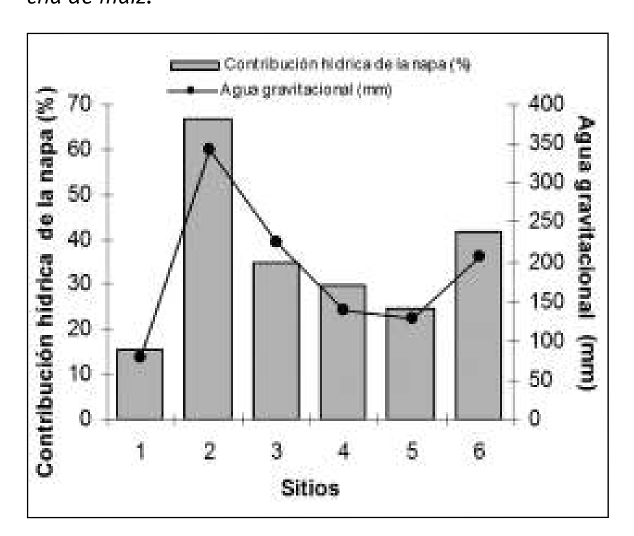


Figura 3. Contribución hídrica de la napa (siembra-cosecha) y contenido de agua gravitacional en los sitios con presencia de napa freática.

El uso consuntivo de maíz en los sitos CN varío entre 493 y 648 mm (datos no presentados), mostrando diferencias entre sitios experimentales y contenidos de agua gravitacional (AG). Los contenidos de AG total variaron entre 77 y 343 mm y se asociaron significativamente con la profundidad del acuífero al momento de la siembra ($p<0,06$) y con la contribución hídrica de la napa (CHN) durante el ciclo del cultivo ($p<0,001$). En los distintos sitios CN, la CHN y la profundidad del acuífero freático al momento de la siembra se asociaron significativamente ($p<0,06$), variando la CHN desde 15,7 % hasta 66,6 % cuando la napa se encontró a los 160 y 60 cm respectivamente (Figura 3).

Los rendimientos promedio de los tratamientos sin fertilizar variaron entre 4012 (SN) y 9454 kg ha^{-1} (CN) con una mayor respuesta a la fertilización en los sitios CN respecto de los SN. Mientras que en los sitios CN la mayor respuesta se obtuvo con la dosis de 120 N (+ 3060 kg ha^{-1}), en los sitios SN solo se observó respuesta en la dosis de 40 N (+ 360 kg ha^{-1}). En los sitios CN se observaron respuestas significativas a la fertilización nitrogenada en las variables rendimiento ($p<0,001$), número de granos por m^2 ($p<0,005$) y número de granos por hilera ($p<0,08$).

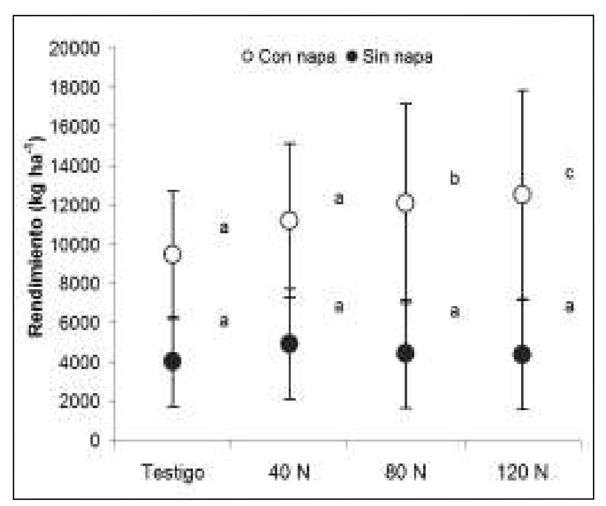


Figura 4. Rendimiento (kg ha^{-1}) de grano de maíz (promedios de sitios) para los distintos tratamientos de fertilización. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p< 0,05$) en sitios con y sin napas (Test Duncan). Las barras verticales representan el desvío estándar de la media.

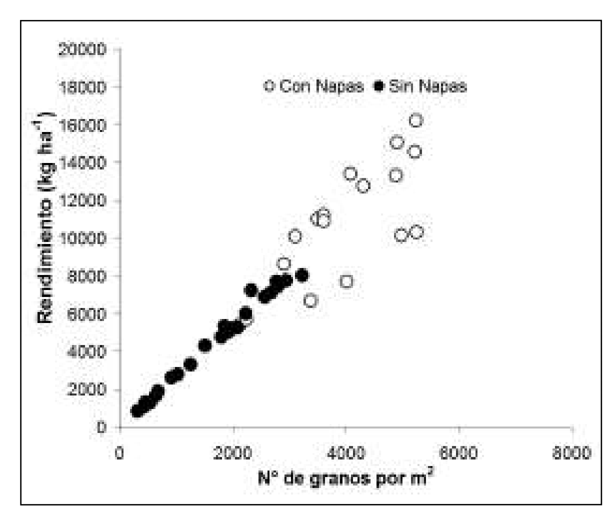


Figura 5. Relación entre el rendimiento y el número de granos por m² en sitios con y sin influencia de napas.

En los sitios CN el AG aportó entre 4,2 y 21,3 kg de N ha^{-1}, no registrándose asociación positiva entre el aporte de nitrógeno freático y la respuesta a la fertilización ($p<0,63$). La Figura 4 muestra la variación de rendimiento y la Figura 5 la variación en el número de granos por m2 de los sitios CN y SN para los distintos tratamientos de fertilización.

El número de granos promedio fue el componente más afectado por la presencia de la napa variando entre 1509 granos por m^2 (SN) y 3429 granos por m2 (CN) en los testigos sin fertilizar. La fertilización incrementó el número de granos en los sitios CN (1092 granos por m^2) en mayor medida que en los sitios SN (337 granos por m^2). Cuando se evaluaron la totalidad de los sitios, la respuesta a la fertilización nitrogenada se relacionó positivamente con el AUF ($R^2= 0,76$) y con el AUS ($R^2=0,69$). En los sitios SN la respuesta a nitrógeno si bien menor que en los sitios CN, se asoció significativamente con los contenidos de agua útil en floración ($p<0,002$). La disponibilidad hídrica durante períodos críticos afecto al número de granos por m^2, principal componente de rendimiento del cultivo. Según Andrade y Sadras (2000) se encuentran correlacionados la tasa de crecimiento del cultivo de maíz con el período crítico y el número de granos fijados. Resultados similares fueron descriptos por Nosetto et al (2009), en ensayos de maíz establecidos sobre diferentes profundidades de napa. En los sitios CN el acuífero freático contribuyo de manera significativa al uso consuntivo total del cultivo registrándose valores cercanos al 16 % y 67 %, mostrando una asociación significativa con la profundidad de la napa al momento de la siembra. Estos valores de extracción de agua requerida por el cultivo de maíz se ubican dentro del rango de 18 % reportado por Babajimopoulos et al. (2007) a 70 % reportado por Sepaskhah et al. (2003).

Los resultados de este trabajo demuestran el efecto positivo de la contribución hídrica y de nutrientes por parte de las napas sobre el rendimiento de maíz y la eficiencia de uso de tecnología (fertilización). Asimismo, muestran la importancia de incorporar el factor napa al planificar el uso de tecnología en manejos sitio-específico en Molisoles de la Planicie Medanosa.

Bibliografía

- Andrade F. H. 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. Field Crops Research 41: 1-12.
- Andrade F. H., A. Cirilo; S. Uhart y M. E. Otegui. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. 1° Ed. Buenos Aires. Editorial la Barrosa. 289 p.
- Andrade F. H. y V. O. Sadras. 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. 1° Ed. Editorial Médica Panamericana S.A. pag. 173-206.
- Babajimopoulos C., A. Panoras, H. Georgoussis, G. Arampatziz, E. Hatzigiannakis y D. Papamichail. 2007. Contribution to irrigation from shallow water table under field conditions. Agricultural Water Management 92:205-210.
- Dardanelli J. L y O. Bachmeier. 1993. Profundidad efectiva de raíces y límite inferior de agua útil determinado en campo para diferentes cereales y oleaginosos. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Trabajos y Comunicaciones Resumidos. págs. 7-8.
- Dardanelli J. L., O. Bachmeier, R. Sereno y R. Gil. 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll. Field Crops Research 54:29-38.
- Eghball B. y J. Maranville. 1993. Root development and N influx of corn genotypes grown under combined drought and N stress. Agronomy Journal, 85:147-152.
- Gaggioli C., D. Funaro, E. Noellemeyer y M. Juan. 2010. Abundancia de raíces y rendimiento de diferentes híbridos de maíz en la región semiárida pampeana. Actas IX Congreso Nacional de Maíz. Simposio de Sorgo, Rosario, Argentina.
- Garnero G. y A. Quiroga. 2003. Caracterización de ambientes para el cultivo de soja y la influencia de la napa de agua. Cultivos de cosecha gruesa. Actualización 2003. Boletín de

Divulgación Técnica N° 77. 230-235.
• Kahlown M. A., M. Ashraf y Zia-Ul-Haq. 2005. Effect of shallow groundwater table on crop water requirements and crop yields. Agricultural Water Management 76:24-35.
• Kramer P. J. 1983. Water relations of plant. Academic Press. 480 pp. En: Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. 2000. Cap. N° 7. págs. 173-206.
• Lorens G. F., J. M. Bennett y L. B. Loggale. 1987. Differences in drought resistance between two corn hybrids. I. Water relations and root length density. Agronomy Journal, 77:519-523.
• Mueller L., A. Behrendt, G. Schalitz y U. Schindler. 2005. Above ground biomass and water use efficiency of crops al shallow water tables in a temperate climate. Agricultural Water Management 75:117-136.
• Nosetto M. D., E. G. Jobbagy, R. B. Jackson y G. A. Sznaider. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. Field Crops Research 113: 138-148
• Otegui M. E. 1992. Incidencia de una sequía alrededor de antesis en el cultivo de maíz. Consumo de agua, producción de materia seca y determinación del rendimiento. Tesis Magíster Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Buenos Aires, Argentina. 93 págs.
• Otegui M. E, F. H. Andrade y E. E. Suero. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. Field Crops Research 40: 87-94.
• Pandey R. K., J. W. Maranville y M. M. Chetima. 2000. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment II. Shoot growth, nitrogen uptake and water extraction. Agricultural Water Management 46:15-27.
• Portela S. I., A. E. Andriulo, E. G. Jobbágy y M. C. Sasal. 2009. Water and nitrate exchange between cultivated ecosystems and groundwater in the Rolling Pampas. Agriculture, Ecosystems and Environment, 134: 277-286.
• PROYECTO ESPECÍFICO DE INTA, AEGA-224032. Dinámica de las napas freáticas en la región pampeana: Amenaza y oportunidad para los sistemas agrícolas y ganaderos.
• Ray J. D., B. K. Samson y T. Sinclair. 1997. Vegetative growth and soil water extraction of two maize hybrids during water deficit. Field Crops Research 52:135-142.
• Sepaskhah A. R., A. Kanooni y M. M. Ghasemi. 2003. Water table contributions to corn and sorghum water use. Agricultural Water Management 58, 67-79.
• Uhart S. A., F. H. Andrade. 1995. Nitrogen deficiency in maize. I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning and kernel set. Crop Sci. 35:1376-1383.

Silvia Aimar, Mariano Méndez, Juan E. Panebianco, Laura de Oro, Fernando Avecilla y Daniel Buschiazzo

Erosión eólica. Avances de su estudio en la Región Semiárida Argentina

La erosión eólica es uno de los procesos de degradación de suelos más importantes en ecosistemas secos (Peterson et al. 2006) y puede ser definida como el proceso mediante el cual se produce la remoción, selección y transporte del material superficial del suelo por la acción del viento (Chepil 1945).

La erosión es un aspecto geológico normal en la evolución de un paisaje y el proceso no se restringe a determinados tipos de suelos o climas. La erosión eólica ocurre en más de un tercio de la superficie de la tierra (Chen y Fryrear 1996). Sin embargo, en algunos sectores de la tierra, como en las regiones áridas y semiáridas dominan éstos procesos de denudación sobre otros. La gravedad de este proceso en estas áreas se debe principalmente a la presencia de suelos secos, sueltos y arenosos, grandes extensiones de planicies con poca a nula cobertura vegetal y fuertes vientos (FAO 1979).

En los últimos tiempos su magnitud se ha incrementado drásticamente debido a la acción antrópica (erosión acelerada). El avance de la frontera agropecuaria, la alta presión de pastoreo, la degradación de la estructura y la falta de prácticas conservacionistas adecuadas conducen a los suelos de éstos ambientes a incrementar su susceptibilidad a erosionarse, lo que tiene efectos sobre procesos como la desertificación y el cambio climático (Nicholson, 2000). Este es un problema global que ha generado estudios en Europa, África (Bielders et al. 2000), Asia (Dong et al. 2000), y en Sud América (Buschiazzo et al. 1999), aunque al presente son aún escasas las investigaciones realizadas sobre ésta temática.

El equilibrio entre la erosión geológica y la acelerada se da cuando el suelo no sufre ningún deterioro progresivo, es decir, cuando la tasa de pérdida de suelo no es superior a su tasa de formación que oscila en 12.5 $Mg.ha^{-1}.año^{-1}$. Se calcula que la erosión eólica se ha incrementado de 100 a 1000 veces en suelos agrícolas de zonas áridas y semiáridas del mundo (Dregne 1986). Buschiazzo et al. (2007) mencionan que un 75% de la superficie Argentina sería muy vulnerable a la erosión acelerada.

Los efectos de la erosión eólica sobre el suelo involucran la disminución de la fertilidad física, tales como reducción de la profundidad efectiva del perfil, cambios granulométricos y degradación de la estructura, y de la fertilidad química por pérdida de materia orgánica (MO) y de nutrientes (Lyles y Tatarko 1986). La emisión de polvo producto de la erosión eólica es otro efecto a considerar, siendo ésta última, una de mayores fuentes de aerosoles atmosféricos que afectan la calidad del aire. Los aerosoles afectan la salud humana, modifican el balance de radiación en la atmósfera, modifican las propiedades de las nubes y la dinámica de nutrientes en ecosistemas marítimos y terrestres, contribuyendo de esta manera a cambios climáticos globales y regionales.

Según Chepil (1961), existen tres fuerzas que definen la movilización de las partículas del suelo por el viento, dos de ellas son desestabilizadoras y producto de la incidencia del viento sobre la partícula: una horizontal de tracción que es proporcional a una fuerza de resistencia y a la superficie expuesta de la partícula y otra vertical ascendente a la superficie del suelo que es la de succión producida por diferencia de presión debajo y encima de la partícula. La tercera fuerza es de carácter estabilizador y es la producida por la gravedad (peso de la partícula). Iversen et al. (1976) mejoró el modelo anterior y comprobó que existe una cuarta fuerza, producida por el contacto entre partículas, que se agrega a la de gravedad y se opone a la fuerza de arrastre del viento y a la fuerza de succión. La movilización de las partículas se produce solamente cuando las fuerzas aerodinámicas (desestabilizadoras) superan la magnitud de las fuerzas estáticas, que mantienen a las partículas agrupadas y adheridas a la superficie

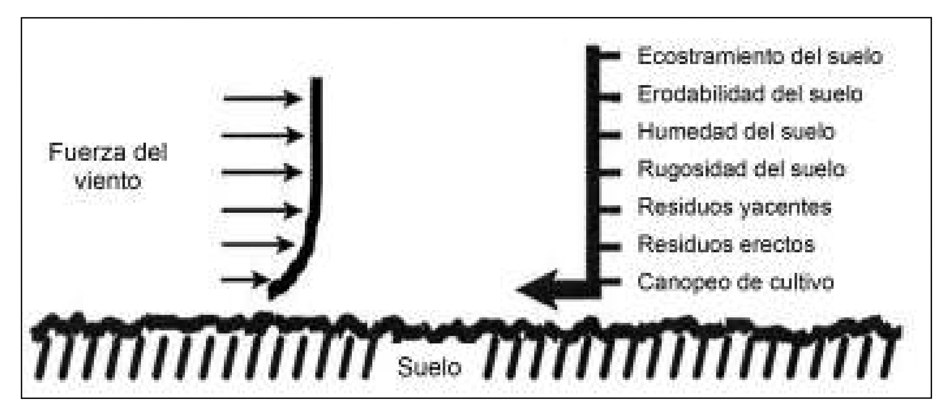


Figura 1. Representación esquemática de los parámetros del suelo y de los cultivos que reducen la fuerza erosiva del viento (extraído de Fryrear et al. 1998).

del suelo. Cabe aclarar que el término "partícula/s" es utilizado en forma genérica, dado que se asume que dicho término involucra también los agregados del suelo.

El proceso de erosión eólica comienza cuando la velocidad del viento supera la velocidad umbral, que es la velocidad mínima necesaria para iniciar dicho proceso. La velocidad umbral es variable y depende de diversos factores relacionados, principalmente, con las condiciones de la superficie del suelo (textura, humedad, rugosidad del terreno, cobertura vegetal (Fryrear et al. 1998) y con las condiciones climáticas (temperatura, precipitación y humedad relativa) (Stout 2004). Todos estos parámetros ofrecen una resistencia a la fuerza del viento. Recién cuando esta fuerza de resistencia es superada se inicia el proceso de erosión eólica (Figura 1).

De acuerdo a su diámetro y densidad, las partículas pueden ser transportadas por saltación, suspensión, o rodadura (Figura 2).

La saltación es la forma de transporte de partículas más importante. Por este proceso se transporta entre un 50 y un 75 % del total de material erosionado por el viento. La saltación provoca, además, los movimientos de suspensión y rodadura. Las partículas son eyectadas desde el suelo al ser elevadas por la masa de aire, siguiendo diferentes trayectorias, dependiendo de la resistencia del aire y de su peso. Una vez puestas en movimiento y transportadas por el flujo de aire, las partículas impactan en la superficie del suelo pudiendo disgregarse, desintegrar otras partículas presentes en la superficie del suelo o rebotar y reiniciar el movimiento nuevamente (Lyles 1988). Las partículas que se transportan por saltación poseen un diámetro que oscila entre los 100-500 µm. Comúnmente, las partículas se elevan a menos de 120 cm de altura, movilizándose el 60% de ellas a una altura inferior a 5 cm. Chepil (1945) reportó que el ángulo de despegue de estas partículas oscila entre 75-90° e impactan sobre la superficie del suelo con un ángulo de 6º a 12°. Este mismo autor ha demostrado que existe en el flujo de saltación una apreciable rotación de las partículas que oscila entre 200-1000 rps. El movimiento de saltación es regular y asimétrico y se calcula a través de la proporción entre la altura de elevación (h) y la longitud de la trayectoria (L). Chepil (1945) encontró,

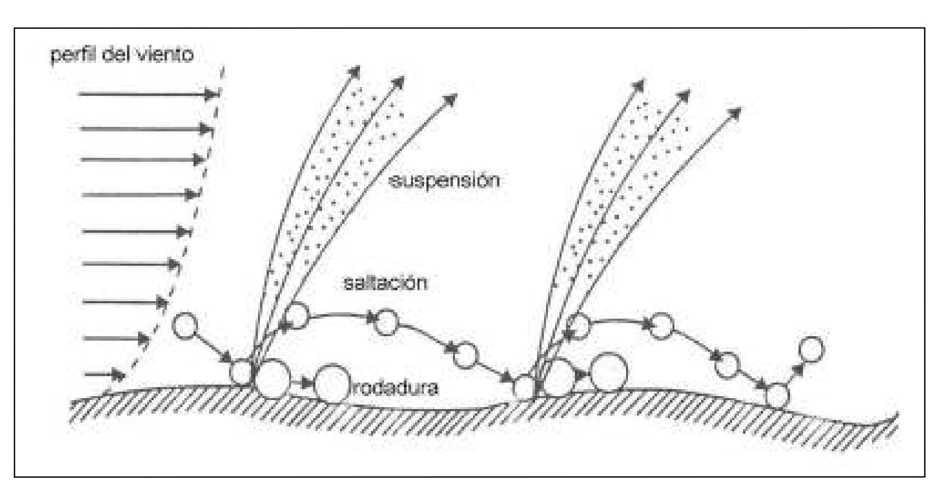


Figura 2. Representación esquemática de los procesos de transporte de partículas por el viento.

para suelos agrícolas, una relación h/L de 1:10. Aunque otros autores consideran que la distancia recorrida varía entre 12 y 25 veces la altura máxima alcanzada (Cooke et al., 1993).

La suspensión se refiere al transporte vertical, y eventualmente horizontal, de partículas muy pequeñas del suelo que son generalmente alejadas de su fuente de origen (Lyles 1988). Estas partículas son la parte más visible de la erosión eólica en forma de grandes tormentas de polvo. Las partículas suspendidas tienen un rango de tamaño que va desde los 2 a 100 μm (Gillette y Walker 1977). Sin embargo, en el transporte a grandes distancias, las partículas <20 μm son las que más predominan ya que las de mayor tamaño poseen mayor velocidad de sedimentación. Si bien partículas <20 μm están presentes en el suelo, la mayor parte de ellas se generan por la acción abrasiva del viento durante el proceso de erosión. Chepil (1945) reportó que entre un 3-38 % del suelo erosionado puede ser transportado por suspensión, dependiendo de su textura.

La rodadura es el transporte que se realiza sin un despegue de las partículas de la superficie del suelo. Las partículas involucradas en este tipo de movimiento poseen un diámetro mayor a 500 μm. La rodadura, en condiciones de vientos fuertes, produce un efecto que aparenta ser un movimiento de avance general de la superficie del suelo, en la dirección predominante de viento. El transporte por rodadura constituye entre el 5-25 % del total del transporte producido por erosión eólica. Si bien es un transporte pasivo, muchas partículas que se mueven por rodadura pueden desgastarse hasta alcanzar el tamaño necesario para sufrir saltación y/o suspensión, cambiando de esta manera su forma de transporte (Chepil 1945).

Predicción y control de la erosión eólica

a) La Ecuación de erosión Eólica en Español (EWEQ)

Los modelos matemáticos de simulación suelen ser la última etapa de una investigación y aunque suelen tener muchas limitaciones, constituyen herramientas de evaluación y control de la erosión eólica. La Ecuación de Erosión Eólica (WEQ, 1965) es el modelo más conocido y utilizado en todo el mundo desde hace más de 30 años. Es un modelo empírico, originalmente diseñado para estimar la erosión potencial media anual en predios agrícolas bajo diferentes condiciones de manejo. A lo largo de los años fue sufriendo modificaciones y mejoras, y a pesar de que han surgido modelos mucho más sensibles, aún hoy tiene vigencia. En Argentina contamos con un modelo que fue originalmente desarrollado a fines de 1990 por agrónomos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos. Esta versión fue traducida y modificada para adaptarla a la región semiárida central de Argentina, la versión resultante se denominó Ecuación de Erosión Eólica en Español (EWEQ, Panebianco y Buschiazzo 2007).

En este modelo la erosión media anual es función de los cinco factores principales que regulan o controlan la erosión eólica de un suelo agrícola, y que a su vez agrupan a un mayor número de variables. Los factores son:

- El factor “I” es el índice de erodabilidad del suelo que refleja la erodabilidad potencial de un suelo y depende principalmente de la textura. Está relacionado al porcentaje de agregados mayores a 0,84 mm de diámetro presentes en la superficie de un suelo seco. Este suele reducirse cuando el suelo está húmedo o encostrado.
- El factor “K” representa la rugosidad del suelo, y depende del tipo de labranza y de su orientación (con respecto a la dirección de los vientos erosivos predominantes). Si bien este factor depende del manejo, debe considerarse que la estabilidad de la rugosidad depende además de las condiciones del suelo al momento de la labranza, del tipo de suelo, y del clima, entre otros.
- El factor climático “C”, representa la capacidad del clima de provocar erosión y depende de la velocidad del viento y del índice de efectividad de precipitación de Thorntwaite. Está basado en condiciones climáticas promedio y puede no representar correctamente la variabilidad interanual. Para reducir el riesgo de erosión, las estrategias de manejo conservacionistas deben concentrarse en los periodos críticos que se dan en forma estacional, en los cuales coinciden las condiciones de alta erodabilidad del suelo con los vientos de mayor energía.
- El factor longitud “L”, representa la longitud expuesta del terreno, este factor depende del largo del predio, de su orientación, y de los obstáculos que existan en el terreno o en sus alrededores. Depende principalmente del manejo y

puede alterarse modificando la orientación del lote, utilizando cultivo en franjas o estableciendo barreras forestales o de otro tipo. Debe considerarse que este valor está permanentemente influenciado por la dirección de los vientos predominantes y su preponderancia. Cuando los valores de preponderancia (pueden verse en tablas en el modelo) son relativamente altos (más de 2,5), las medidas adoptadas para el control de la erosión deben concentrarse en reducir la erosión potencial en el sentido de los vientos predominantes. Sin embargo, si la preponderancia es baja (alrededor de 1 o menos) las medidas de control deben concentrarse más en los cambios estacionales en la velocidad del viento, y no tanto en su dirección. Al provenir la misma energía de diferentes direcciones las medidas "orientadas en un sentido", por ejemplo una cortina de viento, o franjas, o laboreos orientados, no tendrían un efecto protector significativo.

- El factor "V" representa la cobertura vegetal, y depende del tipo, cantidad y orientación del cultivo. Este valor está directamente relacionado con el establecimiento del cultivo, la cosecha, labranzas, picado de rastrojos, quemas, entre otros.

b) Uso del modelo EWEQ

La Ecuación de Erosión Eólica en Español se encuentra disponible en forma gratuita, y es un modelo relativamente sencillo. Sin embargo, su correcto uso requiere de cierta práctica, además de conocimientos de campo específicos del área donde se quiere estimar la erosión eólica, por lo que suele requerir capacitación previa. A continuación se realiza solamente una descripción general sobre el uso del modelo, a manera introductoria. En el último párrafo de este apartado se brinda información de contacto para los que estén interesados en su aplicación.

La EWEQ consiste en una planilla de cálculos, compuesta por una serie de hojas conectadas entre sí mediante funciones lógicas. Ciertas hojas funcionan como base de datos y otras realizan los cálculos para los períodos ingresados por el usuario. La hoja principal es utilizada para el ingreso de los datos que describen el tamaño del predio, la orientación de las labranzas, la erodabilidad del suelo y el clima de la localidad más cercana. La erodabilidad del suelo se estima mediante una tabla, a partir del contenido de arena, arcilla y materia orgánica. El factor climático se obtiene de una lista, pudiendo seleccionarse un factor climático para años normales o años muy húmedos o muy secos, lo que permite apreciar la variabilidad de la erosividad del clima en cada localidad. Debido a la sensibilidad de este factor a las precipitaciones, estos valores representan condiciones muy extremas, por lo que se recomienda siempre el uso del factor climático normal. Para las localidades que no cuenten con factores climáticos específicos, se puede estimar un valor a través de mapas de isolíneas.

Los cálculos de erosión eólica pueden hacerse para cualquier periodo que ingrese el usuario. En cada fila debe cargarse una combinación de cultivos y operaciones que refleje las condiciones de la superficie del suelo. Las listas desplegables permiten simular el crecimiento vegetal en períodos de hasta 15 días, la operación en este caso será la denominada "crecimiento". Las listas desplegables de la columna "operaciones", contienen las principales operaciones que modifican la superficie del suelo y la cobertura vegetal. El modelo cuenta con opciones que permiten modificar los rendimientos, simular el efecto protector de los residuos que permanecen erectos sobre el suelo y estimar el efecto de la humedad superficial aportada por el riego. La evolución de cada variable de interés puede verse en hojas informativas. El aumento o disminución de la cobertura vegetal y de la rugosidad del suelo pueden evaluarse gráficamente. La erosión estimada para cada período también puede verse en gráficos que permiten identificar los períodos de mayor riesgo dentro de la rotación. Esto posibilita realizar modificaciones en los datos ingresados de manera tal de reducir el riesgo de erosión a valores tolerables durante estos períodos, y así evaluar el efecto de distintas estrategias de manejo (fechas, tipo y dirección de labranzas, tipo de cultivos, cantidad de cobertura, franjas, etc.) sobre el riesgo de erosión eólica. El valor tolerable de erosión debe ser determinado para cada sitio, y depende principalmente de las propiedades y limitaciones del suelo. En forma muy general, se estima que este valor se encuentra entre 5 y 9 Mg ha^{-1} $año^{-1}$.

c) Resultados obtenidos con el modelo EWEQ en la Región Pampeana

Se compararon las tasas de erosión anual estimadas por el modelo con las medidas en condiciones de

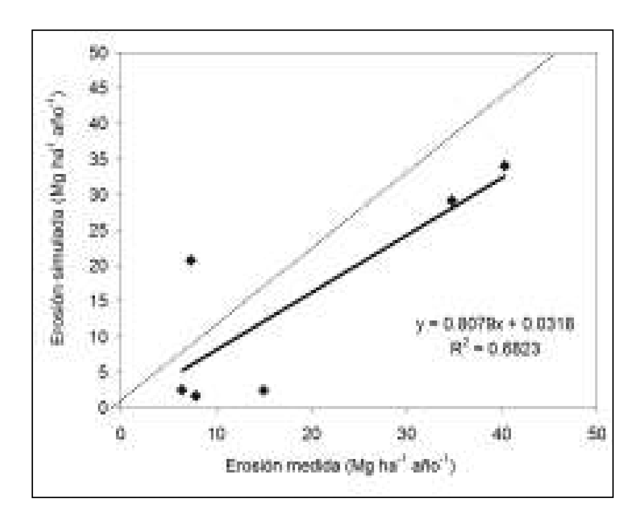


Figura 3. Erosión medida y simulada utilizando factores C anuales.

campo. Algunos de los resultados obtenidos con este modelo se muestran en la Figura 3 y en las Tablas 1 y 2 (Panebianco y Buschiazzo 2007; Panebianco 2010). En la Tabla 2 se muestra la erosión medida y simulada con el modelo en condiciones de baja cobertura en Santa Rosa (La Pampa). Actualmente este modelo está siendo difundido a través de capacitación para su uso en diversos cursos de posgrado.

Control y manejo de la erosión eólica

a) Principios generales

Se han identificado una serie de principios básicos para el control de la erosión eólica:

- Establecer y mantener una cobertura adecuada, ya sea mediante vegetación u otros elementos, principalmente durante los periodos de mayor riesgo de erosión.
- Mantener cobertura vegetal permanente en suelos no aptos para laboreos frecuentes.

Tabla 1. Erosión media anual en un Haplustol Entico bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) en tres escenarios climáticos diferentes (factores C).

Condición climática	Mg ha^{-1} $año^{-1}$ LC	SD
Periodo de alta precipitación (C=1.72)	0.8	0
Condiciones medias (C=11.75)	7.1	0
Periodo de baja precipitación (C=168.06)	143.3	24

- Reducir la distancia desprotegida a lo largo de la dirección predominante de los vientos.
- Producir y mantener agregados y terrones estables sobre la superficie del suelo (considerando terrones a los a gregados de mayor tamaño que se originan a partir de las labranzas).
- Aumentar la rugosidad de la superficie mediante labranzas adecuadas en tiempo y forma.
- Modificar la superficie arable del predio para reducir la erosión en las lomas o en los sitios más expuestos a la acción del viento.
- Mantener siempre superficies no erosionables alrededor de los lotes.

b) Velocidad umbral del viento

Estudios efectuados en la RSPC establecieron que velocidad umbral de viento fue menor en invierno (6.10 m.s^{-1}), intermedia en primavera y verano (8.22 y 8.28 m.s^{-1}, respectivamente) y mayor en otoño (26.48 m.s^{-1}). Estas diferencias estuvieron relacionadas con variaciones de la velocidad del viento, de las precipitaciones, la temperatura y la humedad relativa, factores que influyen sobre las condiciones de la superficie del suelo, produciendo una alta intermitencia en la actividad de saltación. Estos resultados indican que en otoño las condiciones ambientales no favorecen la ocurrencia de erosión eólica y que todo lo contrario ocurre en invierno, primavera y

Año	Factor C Annual	Erosión Medida (t ha^{-1})	Erosión simulada (t ha^{-1})	Predicción (%)
1995	30.29	40.28	34.0	84
1996	4.30	14.98	2.4	16
2002	3.39	7.82	1.6	20
2003	26.67	34.74	29.1	84
2004	4.40	6.39	2.5	39
2005	20.35	7.32	20.7	280
Promedio	**14.9**	**18.59**	**15.1**	**87.2**

Tabla 2. Erosión medida y simulada utilizando factores C anuales.

verano. En estas estaciones deberían desarrollarse sistemas de manejo de suelos que tiendan a mantener las superficies con cobertura y con suficiente rugosidad.

La velocidad umbral promedio anual para suelos de la RSPC es de 7.53 m s^{-1}, siendo ésta superior a la velocidad umbral de 5 m s^{-1} que establece la Ecuación de Erosión Eólica Revisada (RWEQ) e inferior a la velocidad umbral de 8 m.s^{-1} establecida por el Sistema de Predicción de la Erosión Eólica (WEPS). Sería recomendable, de acuerdo a los resultados obtenidos, que los modelos de predicción de erosión eólica consideraran en sus cálculos las variaciones de la velocidad umbral a lo largo del año. El uso de un único valor de velocidad umbral anual debería reflejar las condiciones ambientales y edáficas del sitio bajo estudio.

c) Rugosidad de la superficie del suelo

Los sistemas convencionales de labranza son aún muy difundidos en la RSPC, por esta razón conocer el estado de la rugosidad de la superficie del suelo, tanto natural (Crr) como orientada (Kr), en función del efecto degradante de las lluvias y su relación con la erosión son aspectos muy importantes a tener en cuenta para definir la eficiencia de control de la erosión que tiene una determinada rugosidad del suelo. Se define como Crr a la distribución aleatoria de los agregados presentes en el suelo. En tanto que Kr esta definida por la altura y el espaciamiento de los camellones y es creada por los implementos de labranza (Zobeck 1991). Los datos que se presentan a continuación corresponden a las siguientes herramientas de labranza: arado de rastra, sembradora de grano fino y sembradora lister.

La degradación de Kr por la lluvia (ORR) varía entre tipos de labranza, tipo de suelo y cantidad de lluvia. En un suelo más estructurado (Haplustol éntico) ORR fue altamente dependiente de su valor inicial, siendo menor cuando mayor fue éste. Mientras que en otro suelo menos estructurado (Ustipsammente típico) ORR fue independiente de su valor inicial ya que todas las rugosidades se degradaron casi totalmente por efecto de la lluvia. Por otra parte, la degradación de Crr por la lluvia (RRR) no fue afectada por el tipo de labranza, sino que dependió de las propiedades intrínsecas del suelo, principalmente textura y estructura.

La degradación de ambos tipos de rugosidades se relaciona con la cantidad de lluvia (CUMR) y la energía de la lluvia (CUMEI). El efecto de CUMR y CUMEI sobre Kr varía en función de la altura inicial de los camellones, siendo éstos más estables cuando mayor es su altura inicial y en suelos con mayor agregación. En cambio, la variación de Crr en función de CUMR y CUMEI fue, en ambos suelos, similar para todas las herramientas de labranza. El efecto de la energía y la cantidad de lluvia fue mayor sobre los agregados y clods (terrones de tierra) del suelo más arenoso que los del franco arenoso, que resultaron más estables.

Se obtuvo una ecuación para predecir la degradación relativa de Kr por efecto de la aplicación de una determinada cantidad de lluvia variable, simplemente conociendo el valor inicial de Kr. Esta ecuación fue $y = 41.33x^{-0.72}$ (R^2=0.86, $p<0.001$) para el Haplustol e $y = 46.24x^{-0.27}$ (R^2=0.58, $p<0.001$) para el Ustipsamment, siendo y la degradación relativa y x el valor inicial de Kr. Estos ecuaciones podrán ser utilizadas para suelos con similares características a los aquí presentados y para un rango de altura de camellón de 0 a 26 cm. Deberá analizarse si son válidos para otras condiciones.

Todas las rugosidades simuladas, se expresaron a través de un factor, denominado K'. Este factor es un producto entre la combinación de Crr y Kr) y puede variar entre 1 para superficies lisas y 0 para superficies muy rugosas. Los K' obtenidos variaron entre 0 y 0.85 y lograron disminuir la erosión relativa (cociente entre la erosión producida en condiciones de rugosidad orientada y la obtenida en una superficie lisa) entre un 20 y un 80 % comparado con el tratamiento sin rugosidad (PR), en ambos suelos (Figura 4).

La excepción a esta tendencia fue la sembradora lister (labranza que presenta los camellones de mayor altura y por ende un Kr más alto) que generó para el Haplustol una tasa relativa de erosión que superó a aquella obtenida en la parcela sin rugosidad. Esto se debió a las mayores velocidades y turbulencias del viento que se habrían producido en la parte más elevada de los camellones, zona de mayor remoción de suelo.

Los ajustes entre erosión relativa y K' de ambos suelos se superpusieron a valores de K'>0.5, permitien-

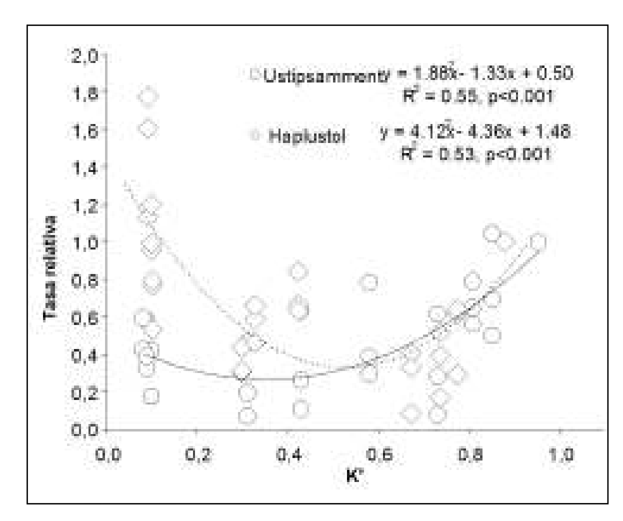


Figura 4. Variación de la tasa relativa de erosión de dos suelos en función del coeficiente de rugosidad (K') calculado a) en base a los valores de rugosidad orientada (Kr) y no orientada (Crr).

do el ajuste de una única ecuación ($y = 2.00x - 0.96$, $R^2 = 0.49$; $p<0.001$), mientras que a rugosidades elevadas ($K'<0.5$) la erosión relativa presentó distintas tendencias en ambos suelos (Figura 4).

Camellones muy altos o muy bajos, dependiendo el tipo de suelo, generaron mayores tasas relativas de erosión que camellones de altura intermedia. La altura óptima del camellón dependió del tipo de suelo: en el Haplustol varía entre 2 y 6 cm, mientras que en el Ustipsamment varía entre 5 y 25 cm respectivamente).

Los resultados presentados ponen de manifiesto que los mayores esfuerzos para controlar la erosión en la región bajo estudio deberían concentrase en todas las estaciones del año, excepto otoño. En estas estaciones será indispensable mantener los suelos con cierta rugosidad para evitar su erosión, principalmente en los Ustipsammentes, que presentan mayor susceptibilidad a erosionarse que los Haplustoles. En invierno, primavera y verano, el control más eficiente de la erosión podrá ser logrado con labranzas que formen camellones de alturas intermedias. Los sistemas lister pueden incrementar la erosión, inclusive con respecto a suelos planos. En otoño es posible utilizar labranzas que produzcan camellones de distintas alturas, aun cuando las elevadas precipitaciones que ocurren normalmente en esta época, puedan causar la degradación de la rugosidad no orientada y orientada del suelo (de Oro 2010).

Hurtado (2012) efectuó un estudio en la región semiárida de San Luis, donde comparó la eficiencia de la orientación de los camellones N-S y NE-SW (a 45° y en sentido paralelo a los vientos predominantes, respectivamente) de siembra del cultivo de girasol, encontrando que la humedad del suelo fue siempre mayor cuando el cultivo estuvo orientado a 45°. Al evaluar algunos componentes del rendimiento se encontró que con esta orientación fueron mayores la altura y diámetro de las plantas, el rendimiento del cultivo y el peso de mil granos, no hallándose diferencias en cuanto a las tasas de erosión.

d) Cobertura vegetal

La cobertura vegetal reconoce las siguientes formas: residuos yacentes, residuos erectos y canopeo cultivos en crecimiento (Armbrust y Bilbro 1997; Sterk y Spaan 1997). Los residuos yacentes son, en general, rastrojos de cultivos anuales, que permanecen en forma horizontal sobre la superficie del suelo luego de la cosecha. Los residuos erectos son rastrojos de cultivos que, luego de la cosecha, permanecen sobre la superficie del suelo con una disposición en un ángulo superior a 30º respecto a la misma. El canopeo del cultivo es la parte aérea de los cultivos en crecimiento.

La fracción de la superficie del suelo cubierta y el porcentaje de cobertura son las medidas utilizadas para evaluar la cobertura del canopeo de cultivos y residuos yacentes respectivamente. Aunque existen otras formas de evaluar la cobertura vegetal, la fracción de la superficie del suelo cubierta y el porcentaje de cobertura son medidas sencillas, rápidas y económicas que arrojan buenos resultados, razón por la cual son muy utilizadas. La fracción de la superficie del suelo cubierta y el porcentaje de cobertura del suelo pueden ser medidas a través de fotografías de la superficie del suelo. Por lo general las fotografías se toman desde una altura de 1.5 m y son descargadas en una computadora donde se le inserta una cuadrícula utilizando algún programa que lo permita (por ejemplo Paint, Paint Shop Pro 7 free edition). Se evalúa en cada punto de intersección de la cuadrícula la cobertura y la fracción de la superficie del suelo cubierta se determina dividiendo los puntos con cobertura sobre el total de puntos evaluados. El porcentaje de cobertura se obtiene multiplicando el resultado anterior por 100. Los residuos erectos pueden ser evaluados eficazmente a través de la

silueta aérea, expresada por unidad de superficie. Este parámetro surge de multiplicar la altura (en cm), el diámetro (cm) y la cantidad de residuos por metro cuadrado; obteniendo así los centímetros cuadrados de silueta aérea por metro cuadrados de suelo. La silueta aérea ha mostrado un buen ajuste con la erosión eólica. El efecto de la cobertura vegetal sobre la erosión eólica se expresa a través de la tasa relativa de erosión (SLR), que es el cociente entre el material erosionado en un suelo con cobertura (con residuos yacentes, erectos y/o canopeo del cultivo) y un suelo sin cobertura y rugosidad. La SRL indica la proporción en que se erosiona un suelo con cobertura respecto de la erosión potencial del mismo suelo.

Las Figuras 5, 6 y 7 muestran la relación entre la SRL y la cobertura con residuos yacentes, erectos y el canopeo de cultivos. Para interpretar la información brindada por estas curvas es necesario tener en cuenta la erosión potencial del suelo, que puede ser medida a campo o puede ser estimada a partir de la fracción erosionable del suelo (agregados menores a 0.84 mm de diámetro) la cual se obtiene con un tamiz rotativo. También es importante considerar que las curvas que relacionan la SLR con la cobertura cambian con la velocidad del viento, siendo las presentadas en las Figuras 5, 6 y 7 obtenidas para velocidades de viento de 10 m s^{-1}. En la medida que la velocidad de viento supera los 10 m s^{-1} las curvas se desplazan hacia arriba, es decir que una misma cobertura es menos efectiva en controlar la erosión eólica a velocidades de vientos mayores. Mientras que, a medida que la velocidad del viento es inferior a 10 m.s^{-1} las curvas se desplazan hacia abajo.

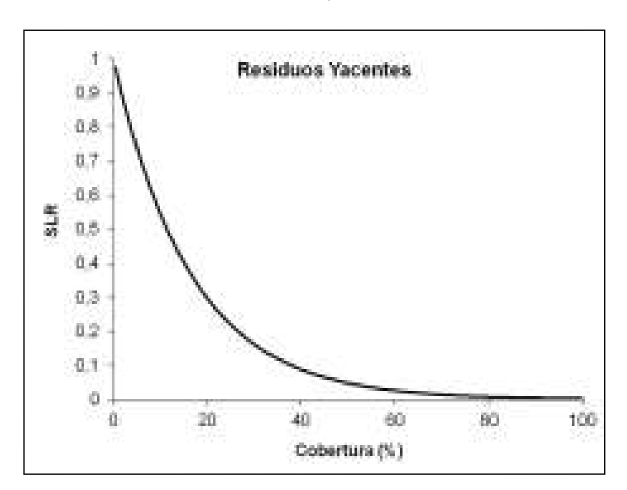


Figura 5. Tasa relativa de erosión (SLR) en función de la cobertura de residuos adyacentes.

Del análisis de las curvas presentadas en las figuras 5, 6 y 7 se desprende que los residuos erectos son 10 veces más efectivos que los residuos yacentes en el control de la erosión eólica. Es decir que, una cantidad dada de residuos erectos (expresados en kg) tiene un control de la erosión eólica 10 veces mayor que la misma cantidad de residuos en posición yacente. También se desprende que el canopeo de cultivos es más efectivo que los residuos yacentes en el control de la erosión.

Para niveles bajos de cobertura (menores al 4 % en residuos yacentes, 100 cm^2 m^{-2} de suelo con residuos erectos y fracciones de superficie del suelo menores 0.04 para conopeo de cultivos) la SLR puede ser superior a 1. Es decir que los suelos con escasa cobertura se erosionan más que los suelos sin cobertura. Esto se debe a que el bajo nivel de cobertura genera turbulencias las cuales facilitan

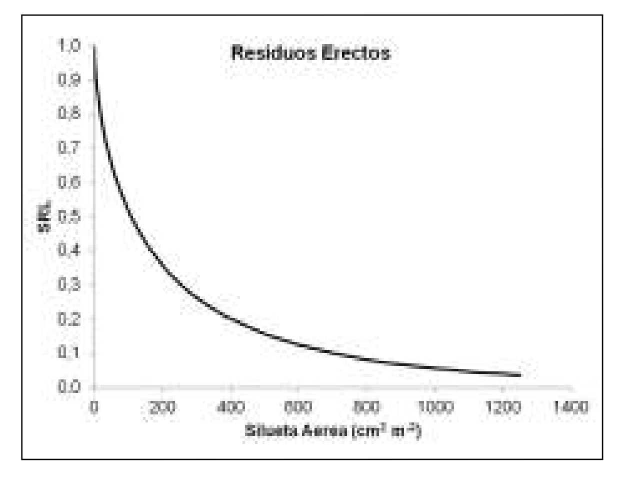


Figura 6. Tasa relativa de erosión (SLR) en función de la cobertura de residuos erectos.

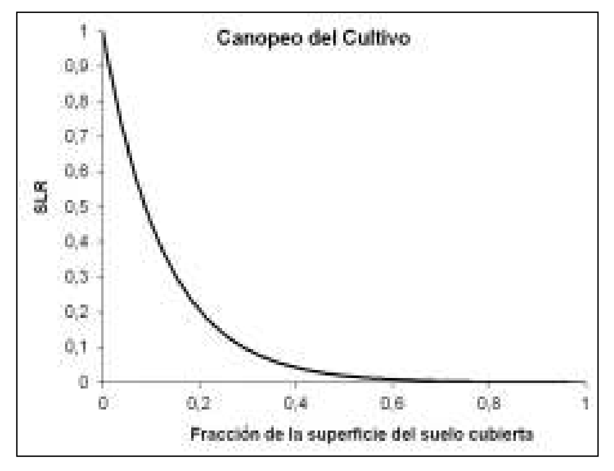


Figura 7. Tasa relativa de erosión (SLR) en función de la cobertura del canopeo de cultivos.

que se inicie el proceso erosivo. Que esto ocurra depende de la interacción entre el tipo de suelo, el nivel de cobertura y la velocidad del viento.

e) Cortinas rompevientos

Las cortinas rompevientos contribuyen a reducir la temperatura del aire, limitar la evapotranspiración ocasionada por vientos cálidos y secos, controlar la erosión del suelo y reducir los daños mecánicos producidos por el viento.

Consisten en barreras, que pueden ser artificiales o naturales, que se ubican en forma perpendicular a la dirección predominante del viento, que actúan como protección del cultivo que se encuentre a sotavento de las mismas. Es frecuente el uso de especies arbóreas que dependiendo de su estructura y porte tendrán diferente grado de permeabilidad. Las cortinas de permeabilidad media son las más eficientes para el control de la erosión dado que no produce a sotavento la turbulencia que se origina cuando la corriente de aire choca contra una barrera impermeable. La distancia de terreno protegido por la barrera es de 10 a 14 veces la altura de la misma.

f) Cultivos en franja

El fundamento principal de ésta práctica consiste en reducir la distancia recorrida por el viento. Se establecen franjas de terreno cultivadas con especies anuales y perennes alternadas con franjas sin cultivar o con cultivos de distinto ciclo, que son realizados perpendicularmente a la dirección predominante del viento. De esta forma se alternan fajas protegidas y fajas protectoras. El ancho de las mismas variará de acuerdo a las características del suelo, principalmente su textura. Una de las aplicaciones de la EWEQ consiste en calcular para la RSPC, los anchos de fajas apropiados para cada suelo. Existen diferentes tipos: Cultivos en contorno, cultivos en franjas de campo, franjas contra la erosión eólica y franjas “buffer”.

- *Cultivos en contorno:* Los cultivos siguen la forma de la pendiente pudiendo variar su ancho. Si bien son utilizados como práctica para controlar erosión hídrica, son útiles también como para erosión eólica. Requiere cultivos manejados en forma homogénea.
- *Cultivos en franjas de campo:* Son franjas de ancho uniforme, no siguen forma de la pendiente y son útiles para zonas con relieve muy quebrado donde no se puede laborear con facilidad.
- *Franjas de erosión eólica:* Son fajas de ancho uniforme, dispuestas en forma perpendicular a la dirección predominante del viento. Se utilizan en terrenos planos sin problemas de erosión hídrica.
- *Franjas “buffer”:* Son franjas de ancho variable. La franja de cultivo protector es más angosta que la del cultivo protegido. Generalmente la especie del cultivo protector tiene mayor altura.

g) Fijación de médanos y dunas

Permite estabilizar la superficie activa de las formaciones arenosas para evitar el avance de las mismas. Para ello deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- *Aislamiento:* debe alambrarse el médano para evitar el pastoreo.
- *Suavizar el médano:* Se puede lograr con el uso de maquinarias como palas o rieles.
- *Siembra:* Debe seleccionarse la especie (Pasto llorón, Mijo, Sorgo negro, otros) y efectuar la siembra mediante sembradoras (cuyo resultado es más uniforme) o al boleo (que resulta menos efectivo).
- *Cubrimiento:* La finalidad es evitar la erosión de las semillas. Puede cubrirse con restos vegetales (paja de cereales, centeno, trigo, sorgo forrajero) o con sustancias orgánicas o inorgánicas (cubiertas artificiales). Debe cubrirse una superficie mínima que garantice la no erosión. Las cubiertas artificiales se dividen en orgánicas (celulosa de madera, emulsiones de resina, solución gelatinizada de almidón, solución lignosulfónica de amonio y azúcares, entre otras) e inorgánicas (asfalto, latex en emulsión acuosa, solución de silicatos de Na y $CaCl_2$, gravas, piedras y rocas fragmentadas).
- *Resiembra:* En caso de ser necesario para cubrir zonas sin plantas.

En algunos casos se le puede dar un uso final al médano, efectuando un pastoreo extensivo y aprovechamiento racional.

Cantidad y calidad del material transportado en suelos de la Región Semiárida Pampeana Central (RSPC)

Una gran proporción de los suelos de Argentina evolucionan sobre sedimentos loésicos, material extremadamente susceptible a ser retransportado por el viento, lo que les confiere una alta erosionabilidad. Mediciones efectuadas durante un año en un Haplustol Entico y un Ustipsammente Típico de la RSPC, en condiciones de máxima erosionabilidad (en un suelo sin cobertura vegetal ni rugosidad) indicaron pérdidas de suelo de 40 $Mg.ha^{-1}.año^{-1}$ y 270 $Mg.ha^{-1}.año^{-1}$, respectivamente, que superan ampliamente las tasas permisibles para suelos de estas texturas (franco arenosa y arenosa franca), que se encuentra en aproximadamente 8 $Mg.ha^{-1}.año^{-1}$.

Al analizar la calidad del material erosionado en dichos suelos se ha comprobado que está enriquecido respecto al suelo original en partículas del tamaño de arena muy fina y limo grueso. Buschiazzo y Taylor (1993) comprobaron que dichos suelos se vuelven más arenosos, que el cambio textural disminuye la capacidad del suelo para acumular MO y la proporción de elementos esenciales, principalmente de fósforo y nitrógeno (Méndez et al. 2006). Este transporte diferencial de las partículas del suelo, en cuanto a su densidad, provocó una relación entre minerales livianos y pesados mayor en los pedones menos erosionados.

El término tasa de enriquecimiento (TE) hace referencia a la relación que existe entre la concentración de un elemento en el sedimento capturado a determinada altura y la concentración del mismo elemento en el suelo original. En el análisis efectuado sobre el material erosionado a distintas alturas (13.5, 50 y 150 cm) en suelos de la RSPC, se comprobó que en todos los casos dicho material estaba enriquecido en MO, P, Ca, Mg, Fe, Mn y Cu respecto al suelo, y que dicha TE era mayor a medida que la muestra se obtenía a mayor altura, lo que significa que las partículas que se mueven por suspensión son las que poseen mayor concentración de nutrientes y MO. Por otra parte, se observó que los contenidos de N y P en el material erosionado dependerán también del tipo de labranza seleccionada. Así se obtuvieron pérdidas de nutrientes provocadas por la labranza convencional y vertical que representaron un 3 % del P total y un 0.03 % del N total. Las tormentas de baja velocidad de viento y larga duración producen mayores pérdidas de P que de N y lo inverso ocurre en condiciones opuestas (Buschiazzo et al. 2007).

Emisión de partículas finas a la atmósfera

Las partículas finas transportadas por suspensión, con diámetros menores a 10 µm (PM10), generan polución ambiental y desencadenan enfermedades respiratorias y cardíacas entre otras. El polvo actúa como núcleo de condensación de nubes, modifica la microfísica y microquímica afectando las propiedades ópticas y radioactivas de las nubes. También puede también afectar la dinámica de nutrientes y el ciclo bioquímico del ecosistema marítimo y terrestre (Herut et al. 2001).

Recientes estudios han demostrado que las fuentes antropogénicas, que incluyen principalmente tierras utilizadas para agricultura y ganadería, aportan la mayor cantidad de polvo en suspensión respecto del total de polvo suspendido en la atmósfera (Ginoux et al. 2001). Korcz et al. (2009) encontraron, para áreas naturales de Europa, un factor de emisión de PM10 de 0.021 $Mg.km^{-2}$, mientras que para áreas agrícolas y áreas antropogénicas los valores fueron 0.157 y 0.118 $Mg.km^{-2}$, respectivamente.

La emisión potencial de PM10 de los suelos depende de la textura, aumenta con el contenido de limo y arcilla y decrece con el contenido de arena (Funk et al. 2008). Otros estudios establecen que la capacidad de emitir PM10 podría estar relacionada al contenido de MO, la distribución de agregados y la estabilidad de los mismos (Alfaro et al. 2008). Por otra parte la humedad del suelo es uno de los factores más importantes que controla la emisión de polvo, ya que la humedad favorece el pegado entre partículas al promover el desarrollo de una película de agua entre los granos del suelo.

Aimar et al. (2012) evaluaron en túnel de viento la producción potencial de PM10 de 7 suelos de distintas regiones áridas y semiáridas de la Argentina: Abra Pampa (AP, Jujuy), Villa Mercedes (VM, San Luis), Santa Rosa (SR, La Pampa), Anguil (AN, La Pampa), Pilcaniyeu (PC, Río Negro), Río Mayo (RM, Chubut) y Potrok Aike (PA, Santa Cruz). Todos los suelos presentaron un rango de humedad dentro del cual la emisión de PM10 decreció linealmente, con el

incremento de la humedad del suelo (Figura 8). Por debajo de este rango la emisión fue máxima y por encima, la emisión fue despreciable. La amplitud del rango de humedad difirió entre suelos, siendo los de SR y AN los que presentaron mayor emisión. La suma de las fracciones finas (limo + arcilla) fue relacionada con la capacidad de almacenamiento de agua en suelos poco desarrollados de la región semiárida pampeana (Quiroga y Buschiazzo 1988). Esto estaría indicando que la amplitud del rango de humedad donde la emisión de PM10 cae linealmente con la humedad del suelo podría estar relacionada con la capacidad de almacenamiento de agua. Suelos con alta capacidad de almacenamiento y agregación necesitan más agua para dejar de emitir debido a que en estos suelos el agua llena primero el interior de los agregados y luego pega las partículas de polvo a las más grandes (Funk et al. 2008).

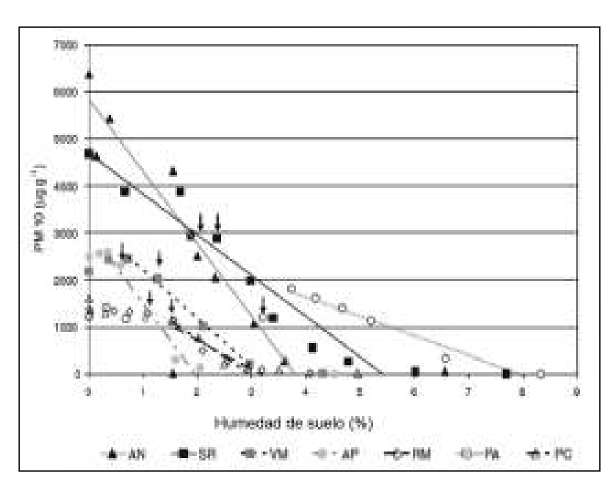


Figura 8. Emisión de PM10 en función al contenido de humedad del suelo para Abra Pampa (AP, Jujuy), Villa Mercedes (VM, San Luis), Santa Rosa (SR, La Pampa), Anguil (AN, La Pampa), Pilcaniyeu (PC, Río Negro), Río Mayo (RM, Chubut) y Potrok Aike (PA, Santa Cruz).

Los suelos con alta emisión de PM10 presentaron alta humedad umbral de emisión, siendo esta la mínima humedad a la cual el suelo deja de emitir PM10. En el caso de SR y AN que tuvieron altas emisiones de PM10 la humedad umbral fue de 3,8 % y 5 % respectivamente. En el resto de los suelos, excepto PA, la emisión de PM10 fue menor al igual que la humedad umbral, la cual vario entre 1.5 y 3.3%. Sólo PA presentó baja emisión y alta humedad umbral (8.35%), probablemente como consecuencia de que posee un alto contenido de MO la cual favoreció la agregación del suelo.

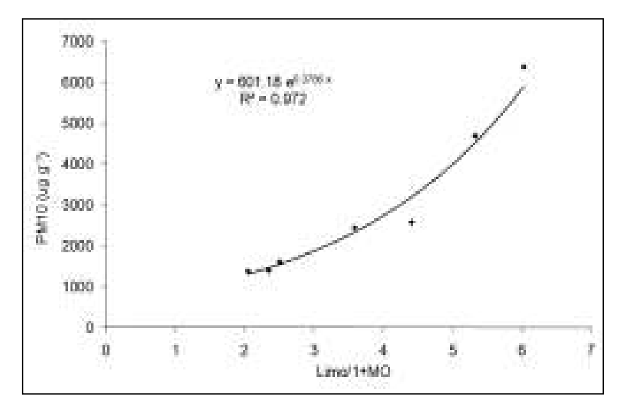


Figura 9. Máxima emisión de PM10 como función del cociente entre el limo y 1+MO.

La Figura 9 muestra la relación entre la máxima emisión de cada suelo (la cual es independiente del contenido de humedad) y del cociente entre el contenido de limo y MO del mismo. Esta relación indica que el limo presente en el suelo está directamente relacionado a la emisión de PM10, mientras que la MO reduce la emisión porque favorece la agregación de partículas que no poseen carga como los limos.

Bibliografía

• Aimar S. B., M. J Mendez, R. Funk y D. Buschiazzo. 2012. Soil properties related to potential particulate matter emissions (PM10) of sandy soils. Aeolian Research3: 437-443.

• Alfaro S. C. 2008. Influence of soil texture on the binding energies of fine mineral dust particles potentially released by wind erosion. Geomorphology 93, 157-167.

• Armbrust D. V. y J. D. Bilbro. 1997. Relating plant canopy characteristics to soil transport capacity by wind. Agronomy Journal 89, 157–162.

• Bielders C., K. Michels y J. L. Rajot. 2000. On-farm evaluation of ridging and residue management practices to reduce wind erosion in Niger. Soil Sci. Soc. Am. J. 64: 1776-1785.

• Buschiazzo D. y V. Taylor. 1993. Efectos de la erosión eólica sobre algunas propiedades del suelo de la Región Semiárida Pampeana Central. Ciencia del Suelo. Vol.10/11: 46-53.

• Buschiazzo D. E., T. M. Zobeck, S. B. Aimar. 1999. Wind erosion in loess soils of the semiarid Argentinian pampas. Soil Sci. 164, 133– 138.

• Buschiazzo D.E.; S. Abascal; T. Zobeck. 2007. Wind erosion in tillage systems in the semiarid Pampa of Argentina. J Arid Environ. 69: 29-39.

• Chen W.y D. W. Fryrear. 1996. Grain-size distributions of winderoded material above a flat bare soil. Phys.

Geogr. 17, 554– 584. Chepil, W.S., Woodruff, N.P., 1963. The physics of wind erosion and its control. Adv. Agron. 15, 211 –302.
• Chepil W. S. 1945. Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind. Soil Sci. 60: 305-332.
• Chepil W. S. 1961. The uses of spheres to measure lift and drag on wind-eroded soil grains. Soil Sci. Soc. Am Proc 25: 243-245.
• Cooke R, A. Warren y A. Goudir. 1993. Desert geomorphology. UCL Press. St. Ives. UK.
• De Oro L. A. 2010. Rugosidad superficial y erosión eólica en suelos de la Región Semiárida Pampeana Central (RSPC), Argentina. Tesis de Doctorado en Agronomía. UNS. 160 p.
• Dong Z., W. Zunming y L. Lianyou. 2000. Wind erosion in arid and semiarid China: an overview. J. Soil Water Conserv. 55, 439– 444.
• Dregne H. E. 1986. Desertification of arid lands. En: Physics of desertification. F. El-Baz and M. H. A. Hassan (eds). Dordrecht, The Netherlands: Martinus, Nijhoff.
• FAO. 1979. Food and Agriculture Organization, United Nations. A provisional methodology for soil degradation assessment. Rome, Italy.
• Fryrear D. W, J. D Ali Saleh, H. M Bilbro, J. E Schomberg y T. M Zobeck. 1998. Revised Wind Erosion Equation (RWEQ). Wind Erosion and Water Conservation Research Unit, USDA-ARS, Southern Plains Area Cropping Systems Research Laboratory. Technical Bulletin N° 1.
• Funk R., H. I. Reuter, C. Hoffmann, W. Engel y D. Öttl. 2008. Effect of moisture on fine dust emission from tillage operations on agricultural soils. Earth Surface Processes and Landforms. 33 (12), 1851 – 1863.
• Gillette D. A. y T. R. Walker. 1977. Characteristics of airborne particles produced by wind erosion of sandy soil, high plains of West Texas. Soil Sci. 123: 97-110.
• Ginoux P., I. Chin, I. Tegen, J. Prospero, B. Holben, O. Dubovik y S. J. Lin. 2001. Global simulation of dust in the troposphere: model description and assessment. J. Geophys. Res. D. 106: 20255-20274.
• Herut B., M. Nimmo, A. Medway, R. Chester and M. D. Krom. 2001. Dry atmospheric inputs of trace metals at the Mediterranean coast of Israel (SE Mediterranean): Sources and fluxes, Atmos. Environ., 35, 803–813, 2001.
• Hurtado P. 2012. Orientación de la siembra de girasol: efectos sobre la erosión eólica y el rendimiento del cultivo en el semiárido de San Luis.Tesis de Magister. Universidad de Buenos Aires. 88 p.
• Iversen J. D, J. B. Pollack, R. Greenley y B R. White. 1976. Saltation threshold on Mars: the effect of interparticle force, surface roughness, and low atmospheric density. Icarus. 29: 319-393.
• Korcz M., J. Fudała y C. Kliś. 2009. Estimation of wind blown dust emissions in Europe and its vicinity. Atmospheric Environment. 43(7): 1410-1420.
• Lyles L. 1988. Basic wind erosion processes. Agric. Ecosystems Environ. 22/23: 91-101.
• Lyles L. y J. Tatarko. 1986. Wind erosion effects on soil texture and organic matter. J. Soil Water Conserv. 41(3): 191-193.
• Mendez M. J, L de Oro, J. E. Panebianco, J. C Colazo y D. E Buschiazzo. 2006. Organic carbon and nitrogen in soils of semiarid Argentina. J. Soil Water Conserv. 61(4): 230-235.
• Nicholson S. 2000. Land Surface Processes and Sahel Climate, Rev. Geophys. 38 (1): 117–139.
• Panebianco J. E. y D. E. Buschiazzo. 2007. Erosion prediction with the wind erosion equation using different climatic factors. Land degradation and Development 19, 36- 44. DOI: 10.1002/ldr.813
• Panebianco J. E. 2010. Ajuste de variables climáticas para el desarrollo de un modelo de erosión eólica para la Región Semiárida Pampeana. Tesis presentada como parte de los requisitos necesarios para obtener el grado de Doctor en Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Argentina, 142pp.
• Peterson Ed. 2006. Management systems in southern South America. De Buschiazzo DE. In: Peterson GA, Unger PW, Payne WA (Eds.) Dryland Agriculture, 2nd Ed., Monograph 23. ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI. Pp 395-426.
• Quiroga A. R. y D. E. Buschiazzo. 1988. Relaciones entre algunos parámetros de suelos de la Región Semiárida Pampeana Central. In Actas del XII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo Ed.; AACS: Corrientes, Argentina, pp. 226.
• Sterk G y W. P Spaan. 1997. Wind erosion control with crop residue. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 911-917.
• Stout J. E. 2004. A method for establishing the critical threshold for aeolian transport in the field. Earth Surfaces Processes and Landforms. 29: 1195-1207.
• Zobeck T. M. 1991. Soil properties effecting wind erosion. J. Soil Water Conserv. 46: 112- 118.

Héctor Lorda y Jorge Caviglia

Incidencia económica de la degradación del suelo por erosión eólica en la Región Semiárida Pampeana

Los sistemas productivos agropecuarios hacen uso de los llamados Agro-ecosistemas, cuyos componentes bióticos y abióticos, son los que proveen los llamados servicios ecológicos o ecosistémicos (SE) (Millennium Ecosystem Assessment M.A 2005a). Estos SE son producidos por interacciones dentro del ecosistema; generan un flujo de bienes y servicios que transforman los materiales primarios que, finalmente, se destinan al bienestar humano (Constanza et al. 1997; Penna y Cristeche 2008). En este contexto, el sistema SUELO, según su potencialidad, brinda una serie de servicios que incluyen: agua, oxígeno y un conjunto de macro y micronutrientes necesarios para el desarrollo de los cultivos, producto de la mineralización de la materia orgánica y de la meteorización del material parental.

La revolución verde de fines de los ´60 y principios de los ´70 y los avances en biotecnología de fines del siglo XX permitieron elevar la productividad y alimentar a 3,6 personas por cada hectárea cultivada. Estas cifras expresan el nivel de agriculturización alcanzada. La Región Pampeana sufrió este proceso en sucesivas etapas desde fines del siglo XIX. La provincia de La Pampa siguió esta misma tendencia, especialmente en el área cultivable de su estepa, sobre aproximadamente 3 millones de hectáreas, en desmedro de pasturas perennes y otros cultivos anuales. La superficie de cosecha gruesa se incrementó un 48% entre la campaña 1999/2000 y la 2009/2010. Uno de los aspectos graves de esta intensificación lo constituye las erosiones hídrica y eólica que se estima abarcan un 20% de las tierras productivas argentinas. Según datos del Instituto de Suelos del INTA (1990) la superficie afectada por erosión eólica en la Argentina abarca una 28 millones de hectáreas (Casas 2002).

La erosión eólica es un *"proceso donde se produce la pérdida de los componentes texturales más finos del suelo, que superado ciertos valores críticos, difícilmente pueda revertirse"*. Se modifican de esta manera las propiedades iniciales del suelo, como el contenido de materia orgánica (MO) (Buschiazzo y Taylor 1993). Su control radica en incorporar prácticas de manejo que tiendan a disminuir la distancia recorrida por las partículas transportadas por el viento. Esto se logra aumentando la rugosidad superficial y la mayor cobertura vegetal, que permiten elevar la velocidad cero del viento sobre la superficie (Buschiazzo et al. 2000). Buschiazzo et al. (2004) cuantificaron la erosión eólica potencial y actual (EEP y EEA) de casi 27 millones de hectáreas, de gran parte de la Región Semiárida y Subhúmeda Argentina, correspondientes a las provincias de La Pampa, San Luis, Córdoba y Buenos Aires. Para estos autores, gran parte del centro-sur de La Pampa esta alcanzado por una EEA de condición severa (+12-20 tn ha^{-1} $año^{-1}$), mientras que la condición grave y muy grave (+20-30 y +30 tn ha^{-1} $año^{-1}$, respectivamente), involucra la franja este de la provincia. En el análisis de este trabajo y en función de la textura de los suelos de esta región, la tasa de erosión umbral de 8 tn ha^{-1} $año^{-1}$ es el límite permisible por sobre el cual el proceso erosivo se torna irreversible y negativo para la "salud" del suelo.

Las pérdidas de macronutrientes como el nitrógeno (N) y fósforo (P), dentro del residuo erosionado conforman un "egreso" dentro del balance de nutrientes y agravan la situación antes descripta. Estas pérdidas son graduales, no percibidas, por ende subestimado y menos aún valorado económicamente. En el corto plazo, el productor no enfrenta "restricciones" de tipo monetarias o de disponibilidad como para asignarles un valor de intercambio a estos SE, aunque se produce una evidente disminución en el stock de nutrientes, con las consecuencias que esto ocasiona en los niveles productivos futuros. La erosión eólica produce la pérdida de suelo fértil y junto a él la de nutrientes que en el largo plazo se transforma un valor social total eventualmente elevado y que no se refleja en un mercado (Farber et al. 2002). Normalmente, el productor no considera entre sus

costos de producción los servicios edáficos que esta utilizando, los que toma de un stock inicial y sobre los que tampoco existe un precio de mercado de referencia. Sin embargo, en el largo plazo, si no son repuestos o el flujo de uso resulta con saldo negativo, respecto a su tasa de generación natural, la actividad no será sustentable económica ni ambientalmente. El proceso puede derivar, inclusive, en una externalidad negativa y en un costo social elevado. Desde esta perspectiva "utilitarista" se estima factible evaluar la incidencia en el uso de los SE de los suelos, a nivel de empresa agropecuaria, para distintos sistema productivos y agro-ecosistemas[1]. Los SE aportados por el suelo, se corresponden con un valor de uso de tipo indirecto, es decir servicios intermedios para "la obtención de productos finales" y que se pueden clasificar como servicios de regulación y soporte (Cristeche y Penna 2007).

A nivel de ensayos experimentales se ha detectado que las pérdidas por erosión eólica, medidas en función del balance de nutrientes, pueden representar una disminución del 25% del margen bruto inicial de un cultivo. Además, en 10 años las pérdidas sucesivas de perfil de suelo podrían hacer perder un 20% del valor comercial de la tierra y hasta un 25% de su productividad (Buschiazzo et al. 2000). Entre los métodos de valuación económica de los SE, se propone utilizar los Costos de Reemplazo-Replacement Cost- (Cristeche y Penna 2007), es decir la posibilidad de reemplazar y valorar el N y P perdidos por efecto de la erosión eólica, analizados como flujo dentro del ciclo productivo (campaña) de los principales cultivos de cosecha y en un período de rotación determinado. La unidad de análisis corresponde a la empresa agropecuaria de administración privada, donde el productor organiza su actividad basada en el beneficio obtenido por la venta de productos finales (granos, carne, leche, etc.) y sujeto a una estructura de costos.

En un contexto de prácticas de laboreo degradativas, inadecuada rotación de cultivos o situaciones de monocultivos, el incremento de la agricultura y pastoreos intensivos, entre otras variables, se generan procesos de erosión eólica actual de nivel moderado a grave, que es posible cuantificar para diferentes zonas. La pérdida de macronutrientes del tipo N y P, dentro del material erosionado, es posible evaluarla económicamente y calcular su incidencia relativa en los costos de producción. La hipótesis de trabajo es que la determinación del costo de reemplazo de estos nutrientes (costo privado) puede causar reducción y aún quebrantos, en los márgenes económicos de los principales cultivos agrícolas de la región.

El objetivo de este trabajo es cuantificar la tasa de erosión eólica en distintos tipos de suelos (*Sitios*) y sistemas productivos de la Región Semiárida Pampeana (RSP) y dentro del material erosionado, estimar la pérdida de N y P. Determinar en forma indirecta el costo de estos nutrientes e incorporarlo a la estructura de costos de los principales cultivos de cosecha. A través de los efectos netos sobre los márgenes económicos, se espera determinar la sustentabilidad económica y ambiental de las mismas.

En la Tabla 1 se propone una clasificación de grados de erosión, según rangos de magnitud de este fenómeno (Buschiazzo et al. 2004).

Tabla 1. Grados de erosión potencial y actual.

Grado de Erosión	EEP ($tn\ ha^{-1} año^{-1}$)	EEA ($tn\ ha^{-1} año^{-1}$)
Ligera	0-20	0-8
Moderada	+20-50	+8-12
Severa	+50-100	+12-20
Grave	+100-150	+20-30
Muy grave	+150	+30

La EEP se define en función de la erosionabilidad potencial de un suelo ("I") y el componente climático ("C"). El primero depende de información básica del suelo, que permite calcular el porcentaje de agregados mayores a 0,84 mm. El factor "C" se calcula con series históricas de datos de lluvias, temperatura y velocidad de viento. La EEA incorpora la acción del laboreo sobre las áreas cultivadas, y los coeficientes de rugosidad que la misma genera (Buschiazzo et al. 2004).

La predicción en la tasa de erosión eólica esta basada en la ecuación de erosión eólica denominado WEQ, en sus siglas en inglés (Wind Erosion

1 Para una explicación del Paradigma "utilitarista", utilizado en la evaluación económica de los SE, véase Penna y Cristeche 2007.

Equation) desarrollado por Woodruff y Siddoway (1965)[2]. Es un modelo empírico diseñado para estimar la tasa de erosión eólica actual en tierras cultivadas, con diferentes condiciones climáticas y propiedades edáficas y establece que:

$$E = f\,(I,C,K,L,V)$$

Donde:
E = tasa de erosión eólica (tn ha^{-1} $año^{-1}$)
I = erodabilidad potencial del suelo.
C = factor climático.
K = factor rugosidad del suelo,
L = longitud del terreno y
V = cobertura vegetal.

Este modelo fue ajustado y calibrado para la RSP mediante experimentaciones durante campañas con condiciones agroclimáticas contrastantes, cultivos de invierno y verano y diferentes condiciones de manejo (Buschiazzo et al. 2006a). La versión en castellano se identifica con las siglas EWEQ y permite estimar perdidas de suelo por erosión eólica, expresadas en toneladas por hectárea (tn ha^{-1}). Se debe cargar con registros detallados de operaciones sucesivas de cultivos (en este caso con destino agrícola) que conforman rotaciones de 1 o más años. Para una rotación de varios años, la tasa de erosión promedio se expresa como toneladas de suelo por hectárea y por año (tn ha^{-1} $año^{-1}$). Debido a que el modelo devuelve la tasa de erosión en un período comprendido entre dos operaciones, fue posible recuperar la erosión total para el ciclo productivo de un cultivo individual (campaña), mediante la suma de los valores parciales entre la primera labor (mecánica o tratamiento químico) y la fecha de cosecha. En este caso, se expresa como toneladas por hectárea por ciclo (tn ha^{-1} ciclo).

El modelo cuenta con una serie agroclimática completa, que brinda un listado de localidades con sus respectivos índices del Factor Climático "C". La investigación realizada por Panebianco y Buschiazzo (2007) permite calcular este índice en forma específica para un año o serie de años y para localizaciones específicas. Para este estudio fue posible contar con estadísticas climáticas (viento y precipitaciones) que permitió generar nuevos factores "C" específicos. El modelo también cuantifica cobertura del material vegetal (verde y seco) y residuos de cosecha.

Selección de sitios a cargar en el EWEQ

El área de interés para el presente trabajo se identifica como la "estepa pampeana", que comprende las regiones geomorfológicas denominadas "Planicie con tosca" y "Planicie Medanosa" (INTA et al. 1981). En función de características agro-climáticas, edáficas, fisonomía y estructura de la vegetación, entre otras, la región fue dividida en subzonas agroecológicas homogéneas, según la descripción y nomenclatura propuesta por la Red de Información Agroeconómica de la Región Pampeana (RIAP), del INTA. Participan en este estudio las subzonas: "Castex"; "Pico" y "Guatrache", cubriendo una superficie de 2.761.238 ha[3].

En función de la disponibilidad de información y con el objeto de aprovechar la variabilidad entre subzonas, se obtuvo información de establecimientos agropecuarios, que en adelante se denominarán sitios y en cuya denominación final se hace referencia a la posición geográfica dentro de la subzona. A continuación se brinda una breve descripción del área de influencia de los 6 sitios seleccionados, a través de los recursos disponibles, la estructura de los sistemas productivos y los cultivos predominantes en las rotaciones cargadas en el modelo EWEQ[4]:

1. Sitio Castex Norte: Sistema mixto, ganadería ciclo completo con invernada de propia producción. Sistema de siembra convencional con incorporación de siembra directa.

Localidad/es de referencia: Embajador Martini; Ing, Luiggi.
Suelo: Textura franco-arenosa, profundidad entre 80 a 100 cm, con limitante de tosca en sectores.
Cultivos predominantes: pasturas perennes (30%)

---

2 La versión en planilla de cálculo electrónica, fue desarrollada por el Ing. Agr.Tom Keepe de la Northern Plains Regional Office Staff, USDA, USA. La hoja "ingresos de datos" fue luego desarrollada por Mike Sporcic, NM State Agronomist y el Ing. Agr. Leigh Nelson, del Central Basin Team, WA, USA. Gary Tibke, colaborador científico en KSU y el mencionado Mike Sporcic, actualizaron las hojas y agregaron operaciones y cultivos.

3 Un mayor detalle sobre esta subdivisión se puede consultar en Lorda y Bellini Saibene 2003.
http://www.inta.gov.ar/pro/radar/info/documentos/zonasagroecologicas/282.htm

4 Para mayor información sobre los sistemas productivos, índices de producción y organización general de la empresa agropecuaria, consultar Lorda et al (2001) y Caviglia et al (2007).

con tres años de duración; predominancia de trigo (40%), soja 1º, soja 2º, maíz doble propósito, verdeos de invierno (40%).

2. Sitio Castex Sur-Santa Rosa: Sistema mixto, con ganadería ciclo completo con invernada de propia producción.

Suelo: Textura franca, profundidad variable del perfil con áreas entre 60-80 cm, con limitante de tosca. Suelos cultivados con transición hacia pastizales naturales (caldenal). Predomina el sistema de labranza convencional.

Cultivos predominantes: pasturas perennes base alfalfa de corta duración con dificultades para su desarrollo. Maíz para cosecha, girasol, trigo, verdeos de invierno (avena y centeno) y maíz doble propósito.

3. Sitio Castex Sur-Anguil: Sistema mixto, con ganadería bovina de invernada de compra.

Suelo: Textura arenoso-franco, profundidad del perfil mayor a 1 m con presencia de tosca ocasional. Áreas de relieve ondulado con textura medanosa y mayor riesgo de erosión eólica en función del manejo. Experiencia de 5 años con siembra directa.

Cultivos predominantes: maíz para cosecha y doble propósito, girasol, trigo, soja y verdeos de invierno (avena y centeno).

4. Sitio Guatraché: Sistema Mixto. Ciclo completo con recría.

Localidad/es de referencia: Gral. Campos; Colonia Santa Teresa y Guatraché.

Suelo: textura franco. Serias limitantes de profundidad del perfil (30-60 cm). Evolución del sistema convencional a la siembra directa.

Cultivos predominantes: alta proporción de verdeos, solos o en mezclas con vicia; predominancia de trigo en situaciones de monocultivo por varias campañas; verdeos de verano (maíz para forraje o doble propósito) escasa proporción de soja y/o girasol.

5. Sitio Pico Norte: Sistema mixto. Predominio de la agricultura.

Suelo: textura arenosa y arenosa-franca. Sin límite de profundidad.

Localidad/es de referencia: Trebolares; Gral. Pico.

Cultivos predominantes: pasturas perennes consociadas base alfalfa con 4 años de duración, verdeo de invierno, soja de 1º, doble cultivo de maíz para cosecha, doble cultivo de girasol, trigo y soja de 2º y siembra directa incorporada los últimos años.

6. Sitio Pico Sur: Sistema Mixto. Invernada predominante.

Localidad/es de referencia: Catriló.

Suelo: textura arenosa y arenosa-franca. Sin límite de profundidad. Avance de la siembra directa en cultivos agrícolas.

Cultivos predominantes: pasturas perennes consociadas base alfalfa con 4 años de duración, verdeo de invierno, girasol como cultivo de verano predominante, maíz para cosecha y con doble propósito y siembra directa incorporada en las últimas campañas.

Las empresas agropecuarias seleccionadas cuentan con registros detallados de fechas, cultivos y prácticas realizadas. Se eligieron series de tiempo lo suficientemente prolongadas (3 a 10 años) de tal forma de contar con cantidad y variedad de cultivos agrícolas. Se descartaron los años con pasturas perennes, excepto en su función de cultivo antecesor o cuando fueran de corta duración. Las series prolongadas permitieron detectar cambios en el sistema de siembra, sustitución temporal de cultivos, efectos del pastoreo con distinta intensidad y frecuencia y prácticas como la fertilización.

Cuantificación y valoración económica de N y P

En varios trabajos se ha medido el contenido de nutrientes en los residuos erosionados, de los suelos predominantes de la RSP. Para el presente trabajo se utilizaron los promedios correspondientes al suelo Haplustol, al que le fue asignado 491 kg de P kg^{-1} de suelo y 0,16 % de N (Aimar 2002; Aimar et al. 2002; Buschiazzo et al. 2004 y 2006b). Para valorar el N y P así determinados, se procedió a calcular su costo en equivalente fertilizante; según la composición de cada nutrientes en las fuentes más utilizadas del mercado y el precio unitario promedio de cada nutriente (Tabla 2).

El sistema de costeo elegido es el denominado Margen Bruto (MB), que consiste en obtener la diferencia entre el ingreso neto (IN) y los costos directos (CD) de producción. En estos costos se valoriza los insumos directos utilizados y la mano de obra involucrada en dicho proceso (Durán et al. 2005). Antes de incorporar el factor ambiental en la ecuación, el MB queda expresado de la siguiente forma:

Fertilizante	Contenido de nutrientes cada 100 kg				$ kg^{-1}		
	N		P		fert.	N	P
	%	kg	%	kg			
UREA	46	46	-	-	1,68	3,65	
UAN	32	32	-	-	1,47	4,61	
CAN	23	23	-	-	1,19	5,17	
FDA	18	18	46	20	2,92		14,58
MAP		11		23	2,92		12,68
SFT	-	-	46	20	2,47		12,36
Promedio						**4,48**	**13,21**

Tabla 2. Costo promedio de N y P según tipo de fertilizante.

$$\text{MB inicial } (\$ \text{ ha}^{-1}) = \text{IN } (\$/\text{ha}) - \text{CD } (\$ \text{ ha}^{-1})$$

Donde:
IN = Ingreso Bruto (IB) – gastos de comercialización
CD= Costos Directos

El costo de reemplazo de N y P, producto de la erosión, se identifica en este trabajo como INDICADOR AMBIENTAL (IA). Este costo se suma a los CD y se calculó el efecto porcentual de este último en le costo total resultante. Su eventual incremento permite obtener el MB neto del IA:

$$\text{MB neto de IA } (\$ \text{ ha}^{-1}) = \text{IN } (\$ \text{ ha}^{-1}) - \{\text{CD}((\$ \text{ ha}^{-1}) + \text{costo reemplazo N y P } ((\$ \text{ ha}^{-1})\}$$

Con los registros provistos por el productor, fue posible estimar los CD privados de: trigo, soja, girasol y maíz de cosecha. Los costos de labranzas, protección y cosecha se calcularon en función del uso de maquinaria propia, influenciados por las propiedades sitio-específico, permitiendo obtener resultados más exactos y la diferenciación ulterior del componente ambiental. La serie de precios utilizada para insumos y productos fue la de Febrero 2008 (Revista Márgenes Agropecuarios 2008). En el caso de los productos, los precios corresponden a las cotizaciones del disponible. Como información complementaria, se calculó la contribución bruta inicial y neta de IA. Se define como el cociente entre el MB y los CD y expresa la ganancia bruta por hectárea obtenida por cada peso invertido. Este índice permite medir el resultado económico alcanzado, independientemente de los valores absolutos de ingresos y costos, y además, comparar cultivos entre si.

La Tabla 3 resume el origen, la cantidad de rotaciones y la distribución de los 63 lotes de cultivos cargados en el modelo, en los 6 sitios bajo estudio. También se cargaron, en forma completa, los verdeos de inverno y verano con sus eventuales aprovechamientos forrajeros.

En aquellos Sitios donde se contó con suficiente cantidad de información, el análisis de los resultados se realizó por cultivo. Cuando la serie de tiempo es lo suficientemente prolongada (5 a 10 años), fue posible diferenciar etapas respecto a la tecnología utilizada, lo que enriquece el análisis en general y el efecto sobre los costos, en particular.

Sitio	Cantidad de rotaciones	Cantidad de cultivos			
		Trigo	Girasol	Soja	Maiz
1. "Castex Norte"	11	7	7	5	7
2. "Castex Sur Santa Rosa"	1	1	2	---	1
3. "Castex Sur Anguil"	2	2	2	---	5
4. "Guatraché"	1	5	---	---	---
5. "Pico Norte"	1	---	2	1	2
6. "Pico Sur"	2	2	8	2	2
Total	**18**	**17**	**21**	**8**	**17**

Tabla 3. Información disponible cargada en el modelo EWEQ.

Sitio Castex Norte

Las 11 rotaciones pertenecen a establecimientos ubicados en los Departamentos Trenel y Realicó (La Pampa). Se incluyen cultivos desde la campaña 96/07 hasta la 04/05 donde predomina la labranza convencional y un uso intensivo y variado de la maquinaria. La tasa de erosión promedio fue de 10,28 tn ha^{-1} con valores desde 7,6 a 12,4 tn ha^{-1}. Esta última alcanza el grado de severa y la mayoría supera el valor umbral de 8 tn ha-1. Aun considerando el uso intensivo del arado de rejas hasta el año 2003 como labor profunda y los reiterados usos de discos (solos o en tandem a la siembra), se estima que son las condiciones climáticas del sitio, los suelos con textura franco y franco-arenosa con un horizonte A bien provisto de MO y estructurado, las que influyen para que la tasa de erosión se mantenga en niveles moderados.

En la Tabla 4 se presenta la información de 7 cultivos de trigo, cargados en 4 rotaciones. En las sucesivas Tablas, en el encabezado se mostrará la tasa de erosión promedio de la rotación y su duración en años. En las primeras filas se encuentra la tasa de erosión del ciclo/campaña del cultivo de referencia y el rendimiento del mismo. En el caso de encontrarse remarcados o sombreados, se corresponden a datos reales. El resto son estimados por el propio modelo.

En el trigo de la campaña 96/97, al que se le realizaron 5 labores, que elevaron su costo de producción en forma inusitada y produjo una tasa de erosión superior a las 8 tn ha^{-1}. El bajo rendimiento de 875 kg ha^{-1}, generó un MB de solo 71 \$ ha^{-1}, que al incorporar los costos de reemplazo del IA, generó una reducción de más del 150% y por ende un quebranto en el MB neto de IA. La contribución bruta resultó de 0,24 \$ ha^{-1} en el MB inicial y negativo al incluir el IA. Esta situación particular de elevado costo relativo y bajo rendimiento, corrobora una de las hipótesis planteadas respecto a los resultados negativos que se obtienen al incluir el IA en los costos de producción.

El resto de los lotes de trigo se pueden considerar de bajo costo, sin la utilización de plaguicidas y fertilizantes y todos conducidos en labranza convencional. Aquellos con una tasa de erosión de 7 tn ha^{-1} (97/98; 00/01 y 02/03), la incidencia del IA supera el 30% de los costos. Para rendimientos de 2,4 tn ha^{-1} (02/03) y 2,6 tn ha^{-1} (04/05), que se consideran elevados para esta región, el MB inicial se redujo en un 12% y 7%, pero con una reducción en la contribución bruta de 43% y 41%, respectivamente. Con tasas entre 3 a 5 tn ha^{-1} la influencia en los costos es menor al 30%. Con rendimientos cercanos a las 3 tn ha^{-1}, la reducción en el MB no llega al 10%. La información disponible de girasol incluye 7 cultivos, dentro de 6 rotaciones y todos conducidos en labranza convencional (Tabla 5). En este cultivo se ha utilizado en forma generalizada el cincel como labor primaria, seguido por una o dos pasadas de rastra de doble acción. A partir de 2001, se comenzó con la aplicación de pulverizaciones a base de glifosato utilizados en pre-siembra u ocasionalmente en pre-emergencia (04/05).

Tabla 4. Efectos del indicador ambiental en los CD y MB. Cultivo de TRIGO Labranza convencional (TrLC).

	Rotación 13a 9,9 tn ha^{-1} (2 años)				Rot. 13b 10,5 tn ha^{-1} (3,2 años)		Rot. 11a 9,4 tnha^{-1} (1,9 años)		Rotación 8 7,6 tn ha^{-1} (3,9 años)					
	Tr LC 96-97	% Dist.	Tr LC 97-98	% Dist.	Tr LC 00-01	% Dist.	Tr LC 98-99	% Dist.	Tr LC 02-03	% Dist.	Tr LC 03-04	% Dist.	Tr LC 04-05	% Dist.
Tasa erosión (tn ha^{-1} ciclo)	8,15		7,54		7,13		4,13		6,91		3,12		4,73	
Rendimiento (tn ha^{-1})	**0,88**		1,95		**2,40**		**2,70**		1,95		1,95		**2,60**	
CD labores y protección	\$ 161	45	\$ 48	19	\$ 72	26	\$ 74	31	\$ 74	25	\$ 74	30	\$ 50	22
CD de insumos	\$ 110	27%	\$ 110	42	\$ 111	39	\$ 111	46	\$ 130	44	\$ 130	53	\$ 111	49
Costo reemplazo de N y P	\$ 111	28	\$ 103	39	\$ 97	35	\$ 56	23	\$ 94	32	\$ 43	17	\$ 65	29
Costo total	**\$ 403**		**\$ 262**		**\$ 280**		**\$ 241**		**\$ 298**		**\$ 247**		**\$ 226**	
Margen Bruto (MB)	\$ 71		\$ 650		\$ 813		\$ 936		\$ 605		\$ 605		\$ 918	
MB neto del IA	-\$ 40	-156	\$ 547	-16	\$ 716	-12	\$ 880	-6	\$ 511	-16	\$ 563	-7	\$ 854	-7
Efecto en la Cont. Bruta		-141		-49		-43		-28		-42		-35		-41

Tabla 5. Efectos del indicador ambiental en los CD y MB. Cultivo de GIRASOL Labranza convencional (GiLC).

	Rot. 2 12,4 tn ha^{-1} (3,2 años)		Rotación 4 9,4 tn ha^{-1} (4,4 años)		Rotación 6 11,4 tn ha^{-1} (2,2 años)		Rotación 11b 10,5 tn ha^{-1} (3,2 años)		Rotación 12 11,2 tn ha^{-1} (3,2años)		Rotación 13b			
	Gi LC 04-05	% Dist.	Gi LC 99-00	% Dist.	Gi LC 01-02	% Dist.	Gi LC 03-04	% Dist.	Gi LC 01-02	% Dist.	Gi LC 99-00	% Dist.	Gi LC 01-02	% Dist.
Tasa erosión (tn ha^{-1} ciclo)	8,11		12,00		8,60		6,79		10,88		9,27		10,18	
Rendimiento (tn ha^{-1})	1,35		**2,38**		1,60		**2,70**		**3,20**		1,12		**1,60**	
CD labores y protección	$ 125	23	$ 100	26	$ 100	29	$ 128	33	$ 93	19	$ 123	33	$ 108	24
CD de insumos	$ 308	57	$ 125	32	$ 125	36	$ 171	44	$ 247	51	$ 125	33	$ 204	45
Costo reemplazo de N y P	$ 111	20	$ 164	42	$ 117	34	$ 93	24	$ 149	30	$ 127	34	$ 139	31
Costo total	**$ 543**		**$ 389**		**$ 342**		**$ 391**		**$ 488**		**$ 374**		**$ 451**	
Margen Bruto (MB)	$ 1.044		$ 2.298		$ 1.496		$ 2.672		$ 3.065		$ 958		$ 1.412	
MB neto del IA	$ 904	-11	$ 2.134	-7	$ 1.378	-8	$ 2.480	-4	$ 2.916	-5	$ 831	-13	$ 1.273	-10
Efecto en la Cont. Bruta		-29		-46		-38		-27		-34		-43		-38

Excepto el cultivo de la campaña 03/04, en todos los casos se superó el umbral de 8 tn ha^{-1}, tanto en los lotes individuales como en cada rotación. La tasa de erosión de 6,79 tn ha^{-1} ciclo, para esta última campaña, implica un 24% en los costos. Para el resto de los lotes, el costo de reemplazo supera el 30%. El máximo de 42% para el girasol 99/00, se corresponde también con la mayor tasa de erosión de 12,00 tn ha^{-1}.

El elevado precio relativo del girasol y rendimientos por encima de las 2 tn ha^{-1}, hacen que los efectos del IA, reduzcan el MB entre el 4 al 7%, en los cultivos 99/00 (R 4), 03/04 (R 11b) y 01/02 (R 12). Los valores de contribución bruta duplican a los de trigo, ubicándose inicialmente entre 8 a 9 $, aunque la inclusión del costo de reemplazo los reduce en un 46%, 27% y 34%, respectivamente. En los 5 lotes de soja disponibles la tasa de erosión de las rotaciones superan las 8 tn ha^{-1}, alcanzando un máximo de 12,4 tn ha^{-1}. Durante las campañas 97/98 y 99/00 se hace uso del arado de rejas como labor primaria seguida de una o dos pasadas de RDA como labor de repaso. La siembra siempre se realiza en tandem con RDA. En el cultivo de la Rot. 6 se alcanza las 5,82 tn ha^{-1} que se estima fue producto del reemplazo del arado de rejas por el cincel.

El cultivo de la campaña 05/06 mostró la mayor tasa

Tabla 6. Efectos del indicador ambiental en los CD y MB. Cultivo de SOJA labranza convencional (SjLC).

	Rotación 2		Rotacion 11 a		Rotación 4		Rotación 6		Rotación 12	
	Sj LC 05-06	% Dist.	Sj LC 97-98	% Dist.	Sj LC 97-98	% Dist.	Sj LC 00-01	% Dist.	Sj LC 99-00	% Dist.
Tasa erosión (tn ha^{-1} ciclo)	11,78		7,97		7,19		5,82		8,67	
Rendimiento (tn ha^{-1})	**3,00**		**2,43**		2,28		**2,00**		**2,50**	
CD labores y protección	$ 73	18	$ 144	27	$ 49	15	$ 122	28	$ 124	26
CD de insumos	$ 182	44	$ 273	52	$ 182	55	$ 235	53	$ 235	49
Costo reemplazo de N y P	$ 161	39	$ 109	21	$ 98	30	$ 79	18	$ 118	25
Costo total	**$ 416**		**$ 525**		**$ 329**		**$ 437**		**$ 477**	
Margen Bruto (MB)	$ 2.221		$ 1.59		$ 1.647		$ 1.293		$ 1.705	
MB neto del IA	$ 2.060	-7	$ 1.486	-7	$ 1.549	-6	$ 1.214	-6	$ 1.586	-7
Efecto en la Cont. Bruta		-43		-26		-34		-23		-30

de erosión (11,78 tn ha^{-1}). Aunque solo se realizaron 2 labores con discos antes de la siembra, se registró un prolongado período de barbecho y entre labores (principios de Julio-fin de Octubre). En estas condiciones, el modelo es sensible a procesos que modifiquen la cobertura vegetal. Esta situación se reitera en otros sitios y aun en planteos de siembra directa.

El menor costo de reposición de N y P en valores absolutos y relativos (18%) se corresponde también a la menor tasa de erosión (5,8 tn ha^{-1}, campaña 00/01). Para valores de erosión entre 7 a 8 tn ha^{-1} ciclo, la participación del indicador se ubicó entre el 20 al 30% de los costos. Con rendimientos por encima de las 2 tn ha^{-1} el MB se ve reducido en alrededor del 7% en todos los casos. En la campaña 05/06 se conjuga la mayor tasa de erosión (11,8 tn ha^{-1}), el mayor efecto en los costos directos (39%) y la mayor caída relativa en la contribución bruta (43%) que inicialmente era de 8,71 $.

Para el cultivo de maíz se dispone de 7 lotes con destino a cosecha y en sendas rotaciones. Las tasas de erosión, rendimiento y cálculos económicos se muestran en la Tabla 7. El cultivo de la campaña 03/04 presentó la menor tasa de erosión (5,44 tn ha^{-1}), producto del aprovechamiento temprano del verdeo de invierno antecesor, descanso posterior con alta cobertura vegetal y que desembocó en un cincel en el mes de Octubre. Tasas reducidas de 5,85 y 6,63 tn ha^{-1}, ambas de la campaña 01/02, responden a labores con discos y realizadas desde mediados de Octubre, aún cuando en la primera de ellas se inicia con un arado de rejas. En el resto de los lotes, la tasa de erosión se ubicó próxima al valor umbral de 8 tn ha^{-1} y se debió a que las labores mecánicas se iniciaron en le mes de Septiembre o se concentraron pasadas de discos y cincel a principios de Octubre.

El cultivo de la campaña 96/97, con un bajo rendimiento de 1,4 tn ha^{-1} y en este escenario de precios, presentó un quebranto en el MB, que se duplicó con la incorporación del IA en los costos directos (20%). El costo total mostró una magnitud similar al resto de los lotes. Las campañas 98/99; 01/02 (Rot.8) y 02/03 presentaron rindes entre 2 y 3 tn ha^{-1}. El IA reduce la contribución bruta entre un 40 al 60%. El efecto en los costos directos es del 22% para las rotaciones 4 y 10 y del 15% para la rotación 8. Los cultivos de las campañas 00/01 (Rot 12) y 01/02 (Rot 11b) lograron rendimientos medios a altos, con 5,5 y 7,0 tn ha^{-1} respectivamente. Siendo la erosión de este ultimo relativamente baja, su impacto en los CD fue de solo el 13%. De esta forma el MB se redujo en un 6% mientras que la contribución bruta lo hizo en un 18 %. En el primer caso el efecto en los CD fue del 18%, afectado por una menor tasa de erosión aunque compensado por menores costos.

Sitio Castex Sur-Santa Rosa

Corresponde a un área de transición entre la estepa cultivable y el bosque de caldén, donde los suelos presentan alta proporción de materiales finos (limo). La predominancia de la ganadería, combinado con altas cargas, reduce o elimina la cobertura vegetal y favorece la compactación de los suelos. Estas condiciones de manejo y tipo se suelo, predisponen al proceso de erosión y dificultan la implementación

Tabla 7. Efectos del indicador ambiental en los CD y MB. Cultivo de MAIZ labranza convencional (MaLC).

	Rot. 3 11,2 tn ha^{-1} (1,4años)		Rot. 4		Rot. 12		Rot. 8		Rot. 11 b		Rot. 10 9,6 tn ha^{-1} (1,4 años)		Rot. 2	
	Ma LC 96-97	%Dist.	Ma LC 98-99	%Dist.	Ma LC 00-01	%Dist.	Ma LC 01-02	%Dist.	Ma LC 01-02	%Dist.	Ma LC 02-03	%Dist.	Ma LC 03-04	%Dist.
Tasa erosión (tn ha^{-1} ciclo)	8,38		7,21		7,76		6,63		5,85		8,54		5,44	
Rendimiento (tn ha^{-1})	**1,40**		**2,05**		**5,50**		**3,08**		**7,00**		**2,63**		4,32	
CD labores y protección	$ 128	22	$ 56	13	$ 100	17	$ 112	19	$ 106	18	$ 106	20	$ 120	24
CD de insumos	$ 330	58	$ 287	65	$ 382	65	$ 398	66	$ 414	69	$ 307	58	$ 312	62
Costo reemplazo de N y P	$ 114	20	$ 98	22	$ 106	18	$ 91	15	$ 80	13	$ 117	22	$ 74	15
Costo total	**$ 572**		**$ 441**		**$ 588**		**$ 600**		**$ 600**		**$ 530**		**$ 506**	
Margen Bruto (MB)	-$ 68		$ 230		$ 1055		$ 352		$ 1.438		$ 322		$ 776	
MB neto del IA	-$ 181	172	$ 131	-43	$ 949	-10	$ 261	-26	$ 1.356	-6	$ 206	-36	$ 702	-10
Efecto en la Cont. Bruta		118		-56		-26		-37		-18		-50		-23

	MaLC 02-03	% Dist.	Tr LC 04-05	% Dist.	Gi LC 03-04	% Dist.	Gi SD 06-07	% Dist.
Tasa erosión (tn ha^{-1} ciclo)	10,19		9,91		9,82		5,85	
Rendimiento (tn ha^{-1})	**2,93**		**2,34**		**1,10**		**1,57**	
CD labores y protección	$ 71	14	$ 58	18	$ 68	18	$ 55	17
CD de insumos	$ 287	58	$ 121	39	$ 183	48	$ 230	70
Costo reemplazo de N y P	$ 139	28	$ 135	43	$ 134	35	$ 45	14
Costo total	**$ 498**		**$ 314**		**$ 386**		**$ 330**	
Margen Bruto (MB)	$ 459		$ 793		$ 918		$ 1.566	
MB neto del IA	$ 320	-30	$ 658	-17	$ 784	-15	$ 1.521	-3
Efecto en la Cont. Bruta		-50		-53		-44		-16

Tabla 8. Efectos del indicador ambiental en los CD y MB.

Ma, Tr y GiSD: Maíz, trigo y girasol en Siembra directa, GiLC: Girasol en Labranza convencional.

de prácticas como la siembra directa. El girasol de la campaña 06/07, es la primer experiencia para la empresa de un cultivo implantado en SD. La tasa de erosión de 5,85 tn ha^{-1} significó una reducción de casi el 50% respecto a las 11,3 tn ha^{-1} de la rotación (Rot 11) de 5,2 años de duración (Tabla 8).

Considerado ambos sitios y a los cultivos en forma conjunta, cuando la erosión del ciclo se ubica entre 5 a 6 tn ha^{-1}, en los cultivos de cosecha gruesa la influencia del IA en los CD se ubica alrededor del 15%. Cuando la tasa de erosión está cercana o supera el valor umbral de 8 tn ha^{-1}, la participación del IA dentro de los costos de estos cultivos supera el 30%, alcanzando máximos del 42%. En el caso del trigo y debido a la propia estructura de costos, con tasas de erosión aún menor a las 5 tn ha^{-1}, el efecto en los CD es mayor (17 -29%). El antecedente experimental de Buschiazzo et al. (2000), fue realizado en girasol y en suelos similares y próximos a los de este último sitio. Las pérdidas de N + P medidas por estos autores, causaron reducciones en el MB de hasta un 27%, con rendimientos superiores a las 1,5 tn ha^{-1}. Con un rendimiento de 1,6 tn ha^{-1}, el girasol 01-02 del Sitio Castex Norte, produjo una disminución del 10% en el MB, mientras que el girasol 03-04 de la Tabla anterior, la pérdida fue del 15% pero con un rinde de 1,1 tn ha^{-1}.

Tabla 9. Efectos del indicador ambiental en los CD y MB. Cultivo de TRIGO.

Rotación	SA 1		SA 2	
Cultivo/campaña	Tr SD 00-01	% Dist.	Tr SD 03-04	% Dist.
Tasa erosión (tn ha^{-1} ciclo)	12,03		4,71	
Rendimiento (tn ha^{-1})	**3,94**		**2,25**	
CD labores y protección	$ 67	12	$ 70	14
CD de insumos	$ 314	58	$ 356	73
Costo reemplazo de N y P	$ 164	30	$ 64	13
Costo total	**$ 546**		**$ 490**	
Margen Bruto (MB)	$ 1.254		$ 508	
MB neto del IA	$ 1.090	-13	$ 444	-13
Efecto en la Cont. Bruta		-39		-24

Sitio Castex Sur-Anguil

El clima de este sitio es similar al anterior aunque los suelos en general son de textura más arenosa y poseen limitantes en la profundidad del perfil. La información de la Tabla 9 pertenece a dos rotaciones:

- La rotación SA 1, con 6,4 años de duración y una tasa de erosión promedio de 12,3 tn ha^{-1} año^{-1}. Se inicia en el año 1997 con labranza convencional, se utiliza la siembra directa en forma aislada en el girasol 99/00 y culmina con la introducción definitiva de la siembra directa en el maíz de la campaña 02/03. Cabe aclarar que se cargo en el modelo el pastoreo de los cuatro rastrojos de maíz, un rastrojo de girasol y el doble aprovechamiento de un verdeo de avena.
- La rotación SA 2 resultó con una tasa de erosión de 9,7 tn ha^{-1} año^{-1}, en un período total de 4,2 años. Esta rotación se inicia en el año 2003 e incorpora la siembra directa desde el trigo de la campaña 03/04.

La incorporación de la SD en trigo, permitió reducir la erosión desde niveles de severidad (>12 tn ha^{-1}),

Tabla 10. Efectos del indicador ambiental en los CD y MB. Cultivos de GIRASOL y MAIZ.

Rotación	SA 1								SA 2			
Cultivo/campaña	Gi SD 99-00	% Dist.	Ma LC 97-98	% Dist.	MaSD 98-99	% Dist.	Ma SD 02-03	% Dist.	Gi SD 06-07	% Dist	Ma SD 04-05	% Dist.
Tasa erosión (tn ha^{-1} ciclo)	5,42		7,04		3,94		14,62		4,11		4,55	
Rendimiento (tn ha^{-1})	**2,31**		**4,42**		**2,63**		**4,10**		**2,45**		**3,88**	
CD labores y protección	$ 59	11	$ 109	18	$ 44	6	$ 62	6	$ 66	10	$ 44	5
CD de insumos	$ 398	75	$ 387	65	$ 604	86	$ 799	75	$ 566	82	$ 719	87
Costo reemplazo de N y P	$ 74	14	$ 96	**16**	$ 54	**8**	$ 200	**19**	$ 56	8	$ 62	**8**
Costo total	**$ 531**		**$ 592**		**$ 702**		**$ 1.060**		**$ 689**		**$ 825**	
Margen Bruto (MB)	$ 2.001		$ 739		$ 88		$ 284		$ 1.970		$ 320	
MB neto del IA	$ 1.927	-4	$ 643	-13	$ 34	-61	$ 84	-70	$ 1.914	-3	$ 258	-19
Efecto en la Cont. Bruta		-17		-27		-64		-76		-11		-25

Gi y MaSD: Girasol y maíz en Siembra directa.
MaLC: Maíz en Labranza convencional.

en el trigo 00-01, a 4,71 tn ha^{-1} en el trigo 03/04 de la rotación SA 2. En este sentido, la influencia del componente ambiental en los costos se redujo en más de la mitad en el cultivo conducido en siembra directa. Aun cuando la labranza convencional logró un rendimiento de casi 4 tn ha^{-1} la caída en el MB es similar en ambos lotes.

En la Tabla 10 se agrupa la información de 2 cultivos de girasol y 4 de maíz. La diferencia en la participación del costo de reemplazo, dentro de los CD, se debe al mayor uso de insumos en la campaña 06/07, principalmente en fertilizantes. Los valores absolutos del MB neto del IA y su reducción porcentual, fue similar en ambos cultivos.

El maíz realizado en siembra directa (98/99) redujo la tasa de erosión en casi un 50% respecto al maíz antecesor (97/98), conducido en labranza convencional. La campaña 02/03 representa un caso particular que se reitera en otros sitios, donde la siembra directa incluye un barbecho prolongado y una tasa de erosión severa (>a 14 tn ha^{-1}). El primer barbecho químico se realiza en el mes de Junio sobre verdeo de avena. Sin evidencias de uso ganadero en el período subsiguiente, el modelo redujo en forma abrupta la cobertura vegetal, situación que se reiteró en un segundo barbecho químico a principios de Octubre. En contraste, al maíz 04/05 se le realizó una única aplicación de glifosato a fines de Octubre, y la siembra fue a mediados de Noviembre.

El elevado costo en aplicación de agroquímicos y fertilización en el maíz 02/03, relativiza el costo del IA (200 $ ha^{-1}), que equivalente al 19% del costo total. El rendimiento moderado de 4,1 tn ha^{-1}, hace que el MB se reduzca en un 70%. En único cultivo de soja realizado en siembra directa obtuvo la menor tasa de erosión del sitio con 2,77 tn ha^{-1} ciclo, con un efecto del IA 5,36%. Influye en este índice, un alto nivel en el uso de insumos que genera un costo total de 704 $ ha^{-1}. El alto precio de la soja hizo que un rendimiento bajo de 1,5 tn ha^{-1} generara un MB neto de IA de 534,3 $ ha^{-1}.

Sitio Guatrache

Los registros de este sitio mostraron dos etapas contrastantes respecto al sistema de labranzas y tecnología utilizadas. Por esta razón se decidió cargar en el modelo, una primera rotación (GC) de 4 años (2000-2004), que utilizó el sistema de labranza convencional. La misma incluye: dos cultivos de trigo para cosecha, una avena para cosecha y una avena con destino a forraje. En una segunda etapa (GD), la empresa decide incorporar la siembra directa, en monocultivo de trigo. En este caso se registraron 3 cultivos con similares planteos tecnológicos. La erosión estimada para la rotación en labranza convencional fue de 10,0 tn ha^{-1} año^{-1}, influenciada por el pastoreo intensivo de verdeos de invierno y

Tabla 11. Efectos del indicador ambiental en los CD y MB. Sitio Guatraché.

	Tr LC 00-01	% Dist.	Tr LC 03-04	% Dist.	Tr SD 04-05	% Dist.	Tr SD 05-06	% Dist.	Tr SD 06-07	% Dist.
Tasa erosión (tn ha^{-1} ciclo)	6,62		9,78		6,10		3,41		4,72	
Rendimiento (tn ha^{-1})	2,93		1,76		2,73		2,34		0,98	
CD labores y protección	$ 109,9	33%	$ 109,9	29%	$ 70,8	14%	$ 78,8	14%	$ 62,8	12%
CD de insumos	$ 132,7	40%	$ 132,7	35%	$ 360,1	70%	$ 428,1	77%	$ 380,9	75%
Costo reemplazo de N y P	$ 90,3	27%	$ 133,5	36%	$ 83,2	16%	$ 46,5	8%	$ 64,4	13%
Costo total	**$ 332,8**		**$ 376,0**		**$ 514,2**		**$ 553,4**		**$ 508,0**	
Margen Bruto (MB)	$ 987,5		$ 462,2		$ 711,6		$ 460,6		-$ 89,1	
MB neto del IA	$ 897,2	-9%	$ 328,7	-29%	$ 628,4	-12%	$ 414,1	-10%	-$ 153,4	-72%
Efecto en la Cont. Bruta		-34%		-54%		-26%		-18%		-50%

SD: Siembra directa, LC: Labranza convencional.

un cultivo de avena con destino a cosecha. En la rotación en siembra directa, el monocultivo de trigo redujo la tasa de erosión a 5,62 tn ha^{-1} $año^{-1}$.

La Tabla 11 resume los resultados productivos y económicos de los cinco cultivos de trigo registrados para este sitio. En los dos cultivos con sistema convencional el costo de reemplazo de N y P resultó del 27% y 36% del costo total, respectivamente, siendo similares los costos de labores e insumos.

Con casi 3 tn ha^{-1} de rendimiento, el primero de los lotes redujo su MB en solo un 9 % y alcanza finalmente una contribución bruta de 2,7 \$ $\$^{-1}$ invertido. Por el contrario, con menor rinde y una tasa de erosión por encima del umbral (9,78 tn ha^{-1}), hace que la influencia del IA reduzca en un tercio el MB original. Si bien la SD determinó un incremento en la participación de los costos de insumos (>70%) y del costos directo total, la menor tasa de erosión hizo que la influencia del IA se ubique entre el 8 al 16%. Los rendimientos por encima de las 2 tn ha^{-1}, para los lotes 04/05 y 05/06, se pueden considerar elevados en función del potencial productivo de esta zona. Sin embargo, con elevado nivel de costos la contribución bruta resulta de 1,2 y 0,7 $ respectivamente, una vez incluido el costo del IA. Para la campaña 06/07, el rendimiento inferior a 1 tn ha^{-1} del trigo 06/07 produjo un quebranto de 89 \$ ha^{-1}, resultado que se redujo un 72% al considerar el costo del IA.

Sitio Pico Norte

La única rotación relevada en este sitio corresponde a una empresa que desarrolla la siembra directa

Cultivo	MaSD 06-07	% Dist.	Sj SD 05-06	% Dist.	Gi SD 04-05	% Dist.	Gi SD 07-08	% Dist.
Tasa erosión (tn ha^{-1} ciclo)	14,39		10,18		6,86		13,04	
Rendimiento (tn ha^{-1})	6,10		2,96		1,68		2,24	
CD labores y protección	$ 123	13	$ 210	21	$ 130	22	$ 208	26
CD de insumos	$ 632	66	$ 635	65	$ 364	62	$ 417	52
Costo reemplazo de N y P	$ 196	21	$ 139	14	$ 94	16	$ 178	22
Costo total	**$ 951**		**$ 984**		**$ 587**		**$ 803**	
Margen Bruto (MB)	$ 950		$ 1.596		$ 1.315		$ 1.756	
MB neto del IA	$ 754	-21	$ 1.457	-9	$ 1.221	-7	$ 1.578	-10
Efecto en la Cont. Bruta		-37		-22		-22		-30

Tabla 12. Efectos del indicador ambiental en los CD y MB.

Ma, Sj y GiSD: Maíz, soja y girasol en Siembra directa.

desde hace varios años y el sistema productivo esta orientado hacia la agricultura de alta tecnología. En los 4,2 años de rotación, la tasa de erosión resultó de 11,0 tn ha^{-1} $año^{-1}$. Además del potencial erosivo de estos suelos, con predominio de texturas arenosas, esta tasa esta influenciada por el uso de labranza convencional y de pastoreo intenso, al inicio de la rotación. Las variables edáficas y agroclimáticas de este sitio, profundizan la sensibilidad del modelo respecto a barbechos prolongados y la consecuente dificultad para definir las condiciones de cobertura del suelo. Conociendo los planteos actuales de la empresa sobre el manejo de la siembra directa y el uso de cultivos de cobertura, se intentó adecuar los residuos de rastrojos, forrajeras y malezas, durante todo el período. Aún así, el modelo arroja valores parciales de erosión elevados y superiores al promedio de la rotación (Tabla 12).

En el caso del maíz 06/07, el girasol 07/08 y la soja 05/06 se realizan barbechos químicos prolongados que se inician en el mes de Abril, luego de la cosecha del cultivo de cosecha gruesa anterior. Las siembras para las tres especies se realizaron en la segunda quincena de Octubre. Con costos totales elevados y fuerte influencia de los insumos, el costo de reemplazo del material erosionado es superior al 20% en el caso de maíz 06/07 y el girasol 07/08, cuyas tasas de erosión son de grado severo. En el caso de la soja 05/06, con una tasa de erosión moderada de 10 tn ha^{-1}, la participación de este índice se reduce al 14%. Se destaca el girasol 04/05 que mostró una tasa de erosión de grado ligera y por debajo del valor umbral (6,86 tn ha^{-1}). También se le realizaron dos aplicaciones de barbecho químico, pero iniciado a fines de Agosto. El menor gasto en todos los rubros, comparado con el resto de los lotes, hace que el IA influya un 16% del total de los CD.

Sitio Pico Sur-Catriló

Al igual que el sitio anterior, las características edáficas de la Subzona "Pico" define suelos profundos, de textura arenosa y paisajes ondulados, susceptibles a la erosión eólica. Se contó con información de dos rotaciones con más de diez años de duración (R 2.1:1994-2007 y R 3.1: 1996-2007). Ambas tuvieron períodos con pasturas perennes base alfalfa (1998-2002 y 2001-2005, respectivamente), las que no se cargaron en el modelo, resultando en 4 rotaciones finales con manejos tecnológicos diferenciales. Para los cultivos forrajeros anuales se contó con información de categorías, carga animal, duración y frecuencia de pastoreos, dándole mayor precisión a las estimaciones del modelo. En la Tabla 13 se agrupan los resultados de trigo y maíz, las rotaciones R2.1, 2.2 y 3.1. En el caso de trigo, el paquete tecnológico de ambos casos se basó en barbechos cortos, con dos pasadas de discos y que dieron origen a tasas de erosión cercanas al umbral. Los mayores costos reducen la participación del IA al 25% en el trigo 98/99 aunque en valores absolutos resulte mayor al trigo 95/96. El mayor rinde del primero también hace que se igualen los efectos en la reducción del MB inicial (11%).

Aunque existe una diferencia de 10 años entre los cultivos de maíz, la principal diferencia tecnológica consistió en el uso de mayor cantidad de herbicidas pre-emergentes en el cultivo más reciente. Sumado a una menor tasa de erosión hizo que en este último,

Rotación	ET 2.2 13,3 tn ha^{-1} (5,3 años)		ET 2.1 11,7 tn ha^{-1} (3,2 años)				ET 3.1 15,4 tn ha^{-1} (4,2 años)	
Cultivo	Ma LC 03-04	% Dist.	Ma LC 94-95	% Dist.	Tr LC 95-96	% Dist.	Tr LC 98-99	% Dist.
Tasa erosión (tn ha^{-1} ciclo)	6,99		7,68		7,50		8,42	
Rendimiento (tn ha^{-1})	5,19		5,00		2,73		3,32	
CD labores y protección	$ 87	15	$ 85	16	$ 89	26	$ 96	21
CD de insumos	$ 411	69	$ 344	64	$ 150	44	$ 247	54
Costo reemplazo de N y P	$ 95	16	$ 105	20	$ 102	30	$ 115	25
Costo total	**$ 593**		**$ 533**		**$ 341**		**$ 457**	
Margen Bruto (MB)	$ 952		$ 969		$ 894		$ 1033	
MB neto del IA	$ 857	-10	$ 865	-11	$ 792	-11	$ 919	-11
Efecto en la Cont. Bruta		-24		-28		-38		-33

Tabla 13. Tasa de erosión, resultados productivos y económicos de TRIGO (Tr) y MAIZ (Ma).

LC: Labranza convencional.

Rotación	ET2.1		ET3.1					
Cultivo	Gi LC 97-98	% Dist.	Gi LC 96-97	% Dist.	Gi LC 97-98	% Dist.	Gi SD 99-00	% Dist.
Tasa erosión (tn ha^{-1} ciclo)	**7,93**		**11,02**		**15,98**		**6,14**	
Rendimiento (tn ha^{-1})	**2,02**		**1,46**		**1,68**		**1,79**	
CD labores y protección	$ 68	20	$ 111	25	$ 72	17	$ 59	11
CD de insumos	$ 165	48	$ 189	42	$ 133	31	$ 422	75
Costo reemplazo de N y P	$ 108	32	$ 150	33	$ 218	52	$ 84	15
Costo total	**$ 342**		**$ 450**		**$ 422**		**$ 565**	
Margen Bruto (MB)	$ 1.936		$ 1.267		$ 1.604		$ 1.448	
MB neto del IA	$ 1.828	-6	$ 1.117	-12	$ 1.386	-14	$ 1.364	-6
Efecto en la Cont. Bruta		-35		-41		-58		-20

Tabla 14. Tasa de erosión, resultados productivos y económicos de GIRASOL.

TrSD: Trigo en Siembra directa, TrLC: Trigo en Labranza convencional.

la participación del IA se ubique en el 16%. En la Tabla 14 muestra una primera etapa en el cultivo de girasol, donde predominó la siembra directa y a continuación, se presentan otros 4 cultivos en el período donde la siembra directa fue incorporada en todas rotaciones.

En los cultivos de las campañas 96/07 y 97/08 era usual el uso de rastrón, rastra de doble de acción y cincel como primera labor profunda. Era generalizada la incorporación de herbicidas presiembra (tipo Trifluralina) y finalmente el escardillo en el estado vegetativo. El girasol 97/98 contó con un barbecho largo desde el mes de Mayo y al igual que lo ocurrido en el Sitio Pico Norte, la erosión superó las 15 tn ha^{-1}. En este caso, la influencia del costo de reemplazo por efecto de la erosión eólica alcanzó el 52%. La primera experiencia en siembra directa de la campaña 99/00, también logro reducir la tasa de erosión a la mitad y a niveles moderados. Con un rendimiento similar a los otros cultivos, el MB se redujo solo un 6%.

El girasol 02/03 tuvo un barbecho químico a base de glisofato + twin pack y paralelamente se le realizó una pasada de rastra de doble acción en forma sectorizada, lo que derivó en su calificación como labranza convencional. Todos los lotes resultaron con tasas de erosión de grado ligera. Con un costos total por encima de los 600 $ ha^{-1} una participación de insumos superior al 75%, los girasoles 05/06 (ET 2.2) y 06/07 (ET 3.2) poseen un costo de reemplazo del 9% de los CD. Aunque en valores absolutos similares, el costo de reemplazo se eleva al 16% y 21 % para el girasol 05/06 y 02/03 respectivamente, productos de costos totales menores. El lote 97/98 (ET3.1) presenta una tasa extrema de 15,98 tn ha^{-1}, producto del girasol en monocultivo, lo que implica un barbecho prolongado y con mantenimiento realizado con discos. En esta con-

Rotación	ET3.2 9,7 tn ha^{-1} (2,2 años)				ET2.2			
Cultivo	Gi SD 05-06	% Dist.	Gi SD 06-07	% Dist.	Gi SD 05-06	% Dist.	Gi LC 02-03	% Dist.
Tasa erosión (tn ha^{-1} ciclo)	**6,45**		**4,23**		**5,90**		**4,76**	
Rendimiento (tn ha^{-1})	**2,02**		**1,40**		**2,20**		**2,24**	
CD labores y protección	$ 66	12	$ 80	13	$ 100	15	$ 54	14
CD de insumos	$ 402	72	$ 494	78	$ 522	76	$ 244	64
Costo reemplazo de N y P	$ 88	16	$ 58	9	$ 65	9	$ 81	21
Costo total	**$ 556**		**$ 631**		**$ 687**		**$ 379**	
Margen Bruto (MB)	$ 1.702		$ 932		$ 1.715		$ 2.083	
MB neto del IA	$ 1.614	-5	$ 874	-6	$ 1.650	-4	$ 2.003	-4
Efecto en la Cont. Bruta		-20		-15		-13		-24

Tabla 14. (Continuación)

GiSD: Girasol en Siembra directa, GiLC: Girasol en Labranza convencional.

Tabla 15. Tasa de erosión, resultados productivos y económicos de SOJA.

Rotación	ET2.2			
Cultivo	Sj LC 04-05	% Dist.	Sj SD 06-07	% Dist.
Tasa erosión (tn ha^{-1} ciclo)	**10,49**		**6,07**	
Rendimiento (tn ha^{-1})	**1,95**		**1,00**	
CD labores y protección	$ 72	14	$ 50	13
CD de insumos	$ 291	57	$ 259	66
Costo reemplazo de N y P	$ 143	28	$ 83	21
Costo total	**$ 507**		**$ 393**	
Margen Bruto (MB)	$ 1.310		$ 548	
MB neto del IA	$ 1.166	-11	$ 466	-15
Efecto en la Cont. Bruta		-36		-33

SjSD: Soja en Siembra directa, SjLC: Soja en Labranza convencional.

diciones el efecto del IA en los CD supera el 30%, excepto en el último caso mencionado que alcanza al 52%. En contraposición, en los registros de lotes en siembra directa de las ultimas campañas, la tasa promedio de erosión se reduce a 5,3 tn ha^{-1}, con una participación del costo de reemplazo entre el 9 al 16%. Cabe aclarar que en este sistema de siembra los costos aumentaron en promedio un 55%, especialmente influenciado por los insumos.

Los dos últimos sitios descriptos, pertenecen a la Planicie Medanosa, con amplia experiencia en el cultivo de girasol. Los registros de este cultivo en labranza convencional, de fines de los ´90, muestran una tasa de erosión promedio superior a las 11 tn ha^{-1}, donde predominaba el "rastrón" y los discos de doble acción en las tareas de labranzas. Eventualmente, la primera labor profunda se realizaba con cincel. Además, se debe adicionar la incorporación del herbicida presiembra, con una pasada extra de rastra superficial. En la Tabla 15 se observa la reducción de la tasa de erosión en el lote de soja conducido en siembra directa, respecto al de labranza convencional (6,0 vs 10,5 tn ha^{-1}), aunque en este último el rendimiento fue la mitad del primero.

A pesar del bajo rendimiento, los menores costos de la siembra directa hacen que el efecto en el MB sea del 15% respecto al 11% en la soja en labranza convencional y similar caída en la contribución bruta. Sin embargo, con casi 2 t/ha de rendimiento, este índice queda reducido a 2,3 $ $^{-1}$ invertido, que en siembra directa resulta de 1,1 $, con la mitad del rendimiento.

Conclusiones

El desarrollo de esta investigación puso en evidencia que, en los sitios estudiados de la estepa pampeana, el fenómeno de la erosión eólica actual superó valores umbrales compatibles con la "salud" del suelo, tanto en valores promedios anuales de rotaciones como en ciclos agrícolas específicos. El modelo EWEQ detectó menores tasas de erosión eólica en siembra directa que en labranza convencional. En condiciones de monocultivo de trigo (Sitio Guatraché), esta diferencia alcanzó un 44% a favor de la siembra directa. Fue algo menor en el Sitio Catex Sur-Anguil (21%) cuando dentro de un sistema convencional se incorporaron experiencias aisladas de siembra directa.

El efecto de la siembra directa también se registró dentro de una misma rotación y para el ciclo de diferentes cultivos: 59% menos entre girasoles en el Sitio Castex Sur-Santa Rosa; 61% menos para trigo en el Sitio Castex Sur-Anguil, y 53% menos para las tasas de erosión promedio, en los lotes de girasol del Sitio Pico Sur-Catriló. En todos los casos, la reducción de la erosión por efecto de la siembra directa, significó un pasaje del grado de erosión de moderado/severo a erosión ligera.

Situaciones particulares de elevada tasa de erosión (>10 tn ha^{-1} ciclo) en siembra directa se presento en barbechos químicos prolongados, con 2 o más tratamientos químicos que reducen sensiblemente el nivel de cobertura de residuos y para los que no se cuenta con información sobre cantidad y calidad de los rastrojos, crecimiento de malezas, cultivos de cobertura (abonos verdes) y eventuales pastoreos.

Particular atención deberá prestarse a las fechas de los registros. Es vital la precisión de este dato, debido a su estrecha vinculación con las variables climáticas, cargadas en la base de datos del modelo. Otro aspecto central para los sistemas mixtos de la RSP es el registro de operaciones que incluya el aprovechamiento directo de forrajeras anuales, perennes y rastrojos, que facilita la estimación de residuos y cobertura y en consecuencia, la precisión en los cálculos de erosión. El dato real de rendimiento, condiciona el volumen de residuos post cosecha.

El costo de reemplazo del indicador ambiental (IA), fue variable entre cultivos, entre sistema de siembra e influenciado por el nivel de costos directos. El trigo en labranza con costos entre 70 a 90 U$ ha^{-1} y tasas de erosión entre 7 a 10 t/ha ciclo, el IA participó desde el 20 al 39%. Con costos entre 100-120 U$ ha^{-1} y tasas entre 10-12 tn ha^{-1}, esta incidencia se ubico entre el 30 al 45%. Los casos de trigo en siembra directa, arrojaron tasas de erosión entre 4 a 6 tn ha^{-1} ciclo y una participación del IA entre el 8 al 16% (aproximadamente 140 U$ ha^{-1} de los CD totales).

El maíz en labranza convencional, con una erosión entre 5 a 7 tn ha^{-1} ciclo, el costo de reemplazo fue del 10 al 15%, mientras que aquellos con tasas entre 7 a 8 tn ha^{-1} el mismo fue del 15 a 22%. La siembra directa mostró valores cercanos a 4 t/ha ciclo, que representó un costo de reemplazo del 8%. Aun con labranza convencional, pero con barbechos prolongados, este cultivo arrojó tasas por encima de 14 tn ha-1 ciclo, haciendo que la incidencia del IA en los costos fuera del 20%. Este valor se redujo porcentualmente, en esquemas con costos directos entre 280 a 300 U$ ha^{-1}.

El girasol en labranza convencional presentó tasas de erosión superiores al maíz. Valores moderados entre 8 a 10 t/ha ciclo, el costo de reemplazo tuvo un participación entre el 20 al 35%. En el Sitio Pico Sur se encontró el valor máximo absoluto de erosión con 16 t/ha ciclo, que representó una participación del IA del 52%. En siembra directa, las tasas de erosión variaron entre 4 a 6,5 tn ha^{-1}, con una incidencia del IA entre 8 al 21%. En el Sitio Pico Norte y aún utilizando siembra directa, un tasa extrema de 13 tn ha^{-1} produjo un efecto del IA del 22%, influenciado por un costo directo total superior a los 280 U$ ha^{-1}.

Aquellos cultivos de soja en labranza convencional con costos directos por encima de los 150 U$/ha y con tasas de erosión entre 7 a 9 tn ha^{-1} tuvieron una incidencia en los costos del IA entre el 20 al 30% (Sitios Castex Norte y Pico Sur). Con un costo total relativamente bajo (100 U$ ha^{-1}) y una tasa de erosión de 7,2 tn ha^{-1}, la participación fue del 30% (Sitio Castex Norte). Se detectó un caso con casi 12 tn ha-1 ciclo, donde la participación del IA fue del 39%.

La diferencia entre el MB inicial y el MB final (neto de IA), está indicando el costo social o pago que debería realizarse al agroecosistema, por las pérdidas causada por la erosión eólica, en la provisión de estos servicios ecológicos (SE). Sin embargo, tecnologías disponibles para el productor y que no implican mayores costos de producción (siembra directa, manejo del agua almacenada, elección de cultivos antecesores y rotaciones planificadas), tienden a reducir estos procesos a niveles compatibles con sistemas sustentables en el largo plazo. Otros factores de manejo que juegan un rol importante en la fertilidad química y física del suelo y que resultaron sensibles en el uso del modelo EWEQ, fueron el aporte de residuos, el cuidado de la cobertura o la frecuencia e intensidad del pastoreo.

La incidencia negativa de la erosión sobre el margen bruto inicial (MB inicial), manifestó quebrantos solo cuando los rendimientos fueron menores a de ciertos límites. En el caso de trigo, este límite se produjo en dos casos con rendimientos fueron inferiores a 1 tn ha^{-1} y para maíz, con una producción inferior a 1,5 tn ha^{-1}. Estos resultados son producto de un escenario de precios (Febrero 2008) muy elevados; producto del alza continua de los mismos desde fines de 2006 y donde las oleaginosas resultaron especialmente favorecidas. La excelente cotización del girasol hizo que con pobres rendimientos (entre 1 a 2 tn ha^{-1}), el efecto en el MB inicial fuera del 10%, reduciéndose al 5% cuando la producción superó las 2 tn ha^{-1}. Los resultados negativos podrían incrementarse frente a caída continua de las cotizaciones desde Marzo de 2008, en combinación con el incremento en el costo de los insumos. Los escasos registros de soja en las rotaciones, mostraron que la pérdida en los ingresos fue del 7 al 8%, con rindes entre 2 a 3 tn ha^{-1}.

Bibliografía

• Aimar S. B. 2002. "Estimaciones cualitativas y cuantitativas de pérdidas por erosión eólica en suelos de la Región Semiárida Pampeana Central". Tesis de Magister en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur. 143 pag.

• Aimar S. B., D. E. Buschiazzo y N. Peinemann. 2002. "Pérdidas de materia orgánica y elementos en suelos de la región semiárida Argentina, producidos por erosión eólica". Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn, Chubut. En CD. 28.

• Buschiazzo D. E y V. Taylor.1993. "Efectos de la erosión eólica sobre algunas propiedades de suelos en la Región Semiárida Pampeana Argentina". Ciencia del Suelo 10:46-53.

• Buschiazzo D. E, N. Zanotti, H. Mirassón, M. Zappa y S.

Abascal, S. 2000. “Incidencia económica de la erosión eólica en sistemas de labranza en la región semiárida”. Siembra Directa II. 319-325.
• Buschiazzo D. E, H. Martinez, E. Fiorucci y C. Guiotto. 2004. “Mapas de erosión eólica actual y potencial en la región semiárida y subhúmeda argentina”. Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos.
• Buschiazzo D. E y J. E. Panebianco. 2006 a. “Revised Wind Erosion Equation (RWEQ), version 5.03 (EWEQ)”. USDA, 1994.
• Buschiazzo D. E, S. Abascal y T. Zobeck. 2006 b. “Wind erosion in tillage systems in the semiarid Pampa of Argentina”. Journal of Arid Environments 69: 29-39.
• Casas R. R. 2002. “La conservación de los suelos y la sustentabilidad de los sistemas agrícolas”. Disertación premio Ing. A Prego 2000. 23 pag.
• Caviglia J. A., H. O. Lorda y J. D. Lemes. 2008. “Determinación de Sistemas Agropecuarios Predominantes para la Estepa y el Caldenal de La Pampa”. (en prensa). EEA INTA Anguil.
• Constanza R. et al. 1997. “The values of the world´s ecosysems services and natural capital”. Nature, V. 387. 253-260.
• Cristeche E. y J. A. Penna. 2007. “Métodos de Valoración Económica de los Servicios Ambientales”. Una primera revisión bibliográfica. INTA/IES. Buenos Aires.
• Durán R., L. Scoponi et al. 2005. Cap. 8: “Los costos en la actividad agropecuaria”. En: El gerenciamiento agropecuario en el siglo XXI. Bases para una competitividad sustentable. Editorial Osmar D. Buyatti. 559 pag.
• Farber S, R. Costanza y M. Wilson. 2002. “Economic and ecological concepts for valuing ecosystems services”. Ecological Economics, 41 (375-392).
• INTA, et al. 1981. “Inventario integrado de los recursos naturales de la Provincia de La Pampa”. INTA, Provincia de La Pampa y Universidad Nacional de La Pampa. Instituto Salesiano de Artes Gráficas (ISAG), Buenos Aires. 493 pp.
• Lorda H. O y Y. Bellini Saibene. “Las Zonas Agroecológicas de AgroRADAR”. EEA INTA Anguil.
• Lorda H. O et al. 2001. “Resultados de la Encuesta Agrícola 1999. I. Región Pampeana del Proyecto RADAR”. Boletín de Divulgación Técnica Nº 1. Imprenta de la EEA INTA Anguil, Área de Apoyo Técnico. 50 pp.
• Lorda H. O, Y. Bellini Saibene, A. Sipowicz, P Lucchetti, Z. Roberto, Z., M. Farell y A. Corró Molas. 2003. ”Caracterización productiva y tecnológica de los cultivos de verano”. En: Cultivos de Cosecha Gruesa. Actualización 2003. Boletín de divulgación técnica Nº 77. EEA INTA Anguil (LP). 264 pag.
• Márgenes Agropecuarios. 2008. Año 23, Nº 272 de Febrero de 2008.
• Millennium Ecosystem Assessment.(2005 a) “Ecosystems and human well-being: General synthesis report”. 155 pag.
• Panebianco J. E y D. E. Buschiazzo. 2007. “Wind erosion prediction with the wind erosion equation (WEQ) using different climatic factors”. Land Degradation and Development. (en prensa).
• Penna J. A. y E. Cristeche. 2008. “La valoración de servicios ambientales: Diferentes Paradigmas”. Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y los recursos naturales Nº 2. Ed. INTA/IES, 44 pag.
• Woodruff N. P. y F. H. Siddoway. 1965. “A wind erosion equation”. Soil Science Society of America Proceeding 29. 602-608.

Alfredo Bono y Nicolás Romano

Nitrógeno

Ciclo del nitrógeno

El nitrógeno (N) es uno de los elementos más ampliamente distribuidos en la naturaleza. El principal reservorio de N es la atmósfera. En el suelo se encuentra bajo tres formas y la Figura 1 muestra un esquema simplificado.

- **Nitratos:** es una forma de N asimilable o disponible por las raíces de las plantas.
- **Amoniacal:** es una forma de N de transición y no abunda en el suelo.
- **Orgánicas:** se encuentra en la materia orgánica y es la única fuente permanente o reserva de N en el suelo.

Por sus funciones en la fisiología de las plantas, es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Los altos requerimientos de N de las plantas lo convierten en un factor limitante en todos los suelos del mundo. Los suelos de la Región Semiárida y Subhúmeda Pampeana (RSSP) se caracterizan por su bajo contenido de N. Al avance de la agricultura y los procesos de degradación, originados por el excesivo laboreo del suelo acentúan esta deficiencia dado que los primeros centímetros son los más fértiles (Figura 2).

En la dinámica de este nutriente en el suelo el N orgánico y los nitratos son las formas más importantes a tener en cuenta en la productividad de los cultivos. La Figura 2 muestra los niveles bajos, medios y altos de N orgánico para la RSSP. Los contenidos de N para los niveles más bajos son de 4000 kg ha-1 mientras que para niveles altos son de 12000 kg ha^{-1} para todo el perfil del suelo. Con altos niveles de N orgánico habrá mayores posibilidades de liberar nitratos en el suelo.

La Figura 3 muestra la evolución del N de nitratos (disponible) en una secuencia de cultivos agrícolas. En general los niveles más altos corresponden a la siembra, después de los barbechos y los valores más bajos a la cosecha.

Uso de leguminosas

Implantación de pasturas con base alfalfa

Los bajos niveles de fertilidad nitrogenada podrían corregirse con fertilizantes (urea etc.,) e implantación de leguminosas (Tabla 1). En un trabajo realizado sobre 22 lotes de alfalfa con distintas texturas, niveles de MO e historia previa, se concluyo que la alfalfa puede jugar un rol muy importante en la con-

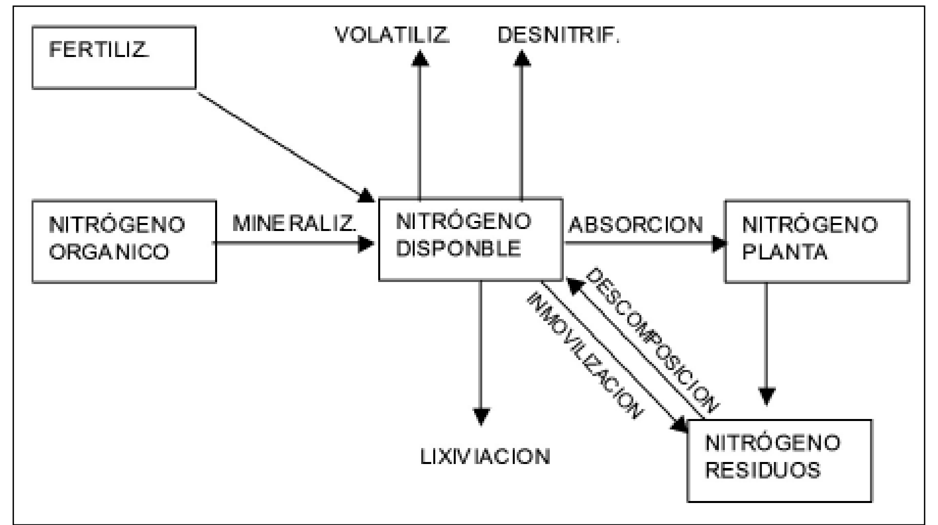


Figura 1. Esquema de las principales vías de entrada y salida de nitrógeno al pool disponible del suelo en cultivos no leguminosos. (Adaptado de Alvarez 1999).

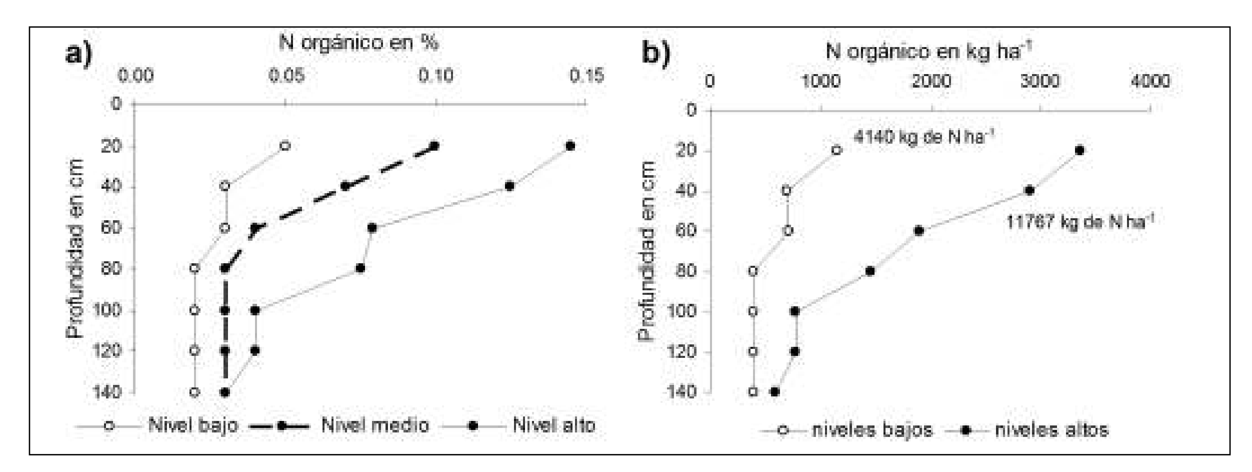


Figura 2. Distribución del contenido de N orgánico en el perfil del suelo. a) valores en % y b) en kg de N orgánico por ha.

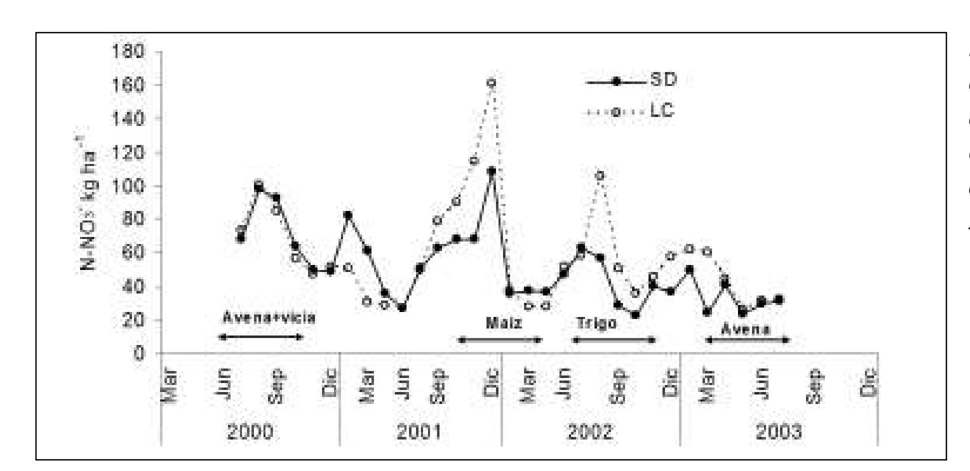


Figura 3. Dinámica de N disponible en el suelo bajo dos sistemas de labranzas en una rotación de cultivos agrícolas en la región semiárida pampeana.

Localidad	Fijación de N ($Kgha^{-1}$ $año^{-1}$)	Rango ($Kgha^{-1}$ $año^{-1}$)	CV (%)
Rafaela (Santa Fé)	408	392-427	4
Manfredi (Córdoba)	234	136-308	21
Gral. Villegas (Buenos Aires)	376	276-511	28
Anguil (La Pampa)	137	119-169	15
Barrow (Buenos Aires)	112	59-199	50

Tabla 1. N derivado de la Fijación biológica en alfalfa en diferentes localidades de la región pampeana argentina (adaptado de Brenzoni y Rivero 1999).

servación y mejoramiento de la fertilidad nitrogenada en suelos de la RSSP. No obstante, un mal manejo puede traer aparejado una reducción en el número de plantas, invasión de malezas, que pueden disminuir los beneficios de incluir pasturas en base a leguminosas. Otros aspectos a tener en cuenta son los niveles de fósforo (P) asimilable en el suelo (Bono y Fagioli 1994). En suelos muy degradados, el uso de pasturas no es suficiente para recuperar la fertilidad, sino que debe acompañarse con prácticas de fertilización, sobre todo cuando se realiza henificación.

Verdeos asociados con leguminosas

Los verdeos de invierno tienen una gran importancia económica por ser la principal fuente de forraje durante el otoño y el invierno en la planicie con tosca sur de La Pampa. En los últimos años se está trabajando en el mejoramiento genético y otros aspectos tecnológicos como sistemas de labranza y fertilización etc. de los verdeos para mejorar su producción. Una de las alternativas para mejorar la calidad y la producción de los verdeos es a través de su asociación con leguminosas. Con el objetivo de conocer el efecto sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y el contenido de N en planta de

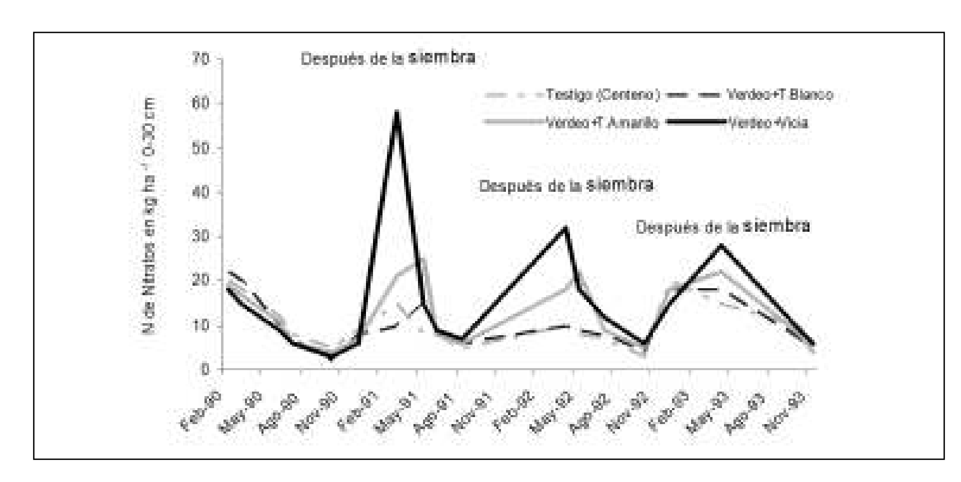


Figura 4. Dinámica de N de nitratos en kg ha^{-1} hasta los 30 cm de profundidad durante más de tres años en los cuatro tratamientos bajo estudio.

verdeos asociados con leguminosas, se realizaron durante varios años una serie de ensayos en el Departamento Guatraché. Los mismos consistieron en comparar verdeos (avena y centeno) puros con estos mismos verdeos asociados con vicia, trébol blanco y trébol amarillo.

De todas las propiedades estudiadas, la más destacada fue la dinámica del N de nitratos en el suelo (N disponible para las plantas). Luego del primer año se observan después de la siembra niveles más altos en los verdeos asociados a leguminosas, en especial vicias (Figura 4). Esto equivaldría a una fertilización de 20 a 50 kg ha^{-1} de N. Posiblemente, el mayor efecto se observó en vicia porque está leguminosa tiene una muy buena nodulación, en especial en el período de floración (octubre, noviembre). No hubo diferencias en el consumo de agua del suelo, pero sí una mayor eficiencia de uso en verdeos asociados con leguminosas, o sea mayor producción por mm de agua consumida. El contenido de N orgánico en planta para corte en los años en estudio en avena asociada con vicia, siempre fue mayor que el de avena pura. Por otro lado, los niveles de N orgánico en la planta de vicia son siempre altos, contribuyendo aún más a la calidad forrajera de la pastura (Tabla 2).

En el año 2009 Falcone (2012) seleccionó un lote de la EEA INTA Anguil, dónde se realizó la experiencia sobre un suelo Haplustol Entico. Los tratamientos que se llevaron a cabo fueron los siguientes:

- Vicia enterrada cómo abono verde (AV)
- Vicia quemada con herbicidas (CC)
- Testigo sin remoción (TSR).
- Testigo con remoción (TCR).

La razón de realizar dos tratamientos testigo fue para poder comparar el efecto de la remoción sobre la liberación de N mineral, vía mineralización de la MO. Uno de los tratamientos contempló un barbecho químico y el otro un barbecho realizado en forma convencional por medio de una labranza con rastra de discos. La siembra de maíz se realizó el 30 de noviembre, a una distancia entre hileras de 52,5 cm y una densidad de 76000 pl ha^{-1}. La Tabla 3 muestra el rendimiento en grano, la producción de materia seca y la eficiencia del uso del agua en el cultivo de maíz.

- Los verdeos con vicia tienen efectos positivos sobre la producción y calidad del forraje.
- Incrementan el nivel de N disponible en 20 a 45 kg ha^{-1}.

Ciclo 1992	Primer Corte 8 de Agosto	Segundo Corte 23 de octubre	Tercer Corte 29 de diciembre
Avena pura	2,05	1,53	
Avena+ vicia	2,44	1,81	
Vicia	4,53	3,94	4,06
Ciclo 1993	**20 de mayo**	**19 de octubre**	
Avena pura	2,00	1,25	
Avena+ vicia	2,71	1,45	
Vicia	2,87	4,01	

Tabla 2. Porcentaje de N en planta para avena pura, vicia y avena asociada con vicia. Para dos años y diferentes cortes.

Tratamientos	Rendimiento		EUAgua	
	Kg MS ha^{-1}	Kg grano ha^{-1}	Kg Ms mm^{-1}	Kg grano mm^{-1}
CC	9758	8290	16	13
AV	10698	9106	17	14
TSR	4611	4575	9	8
TCR	7625	5609	13	10

Tabla 3. Rendimiento de Materia Seca en floración, rendimiento en grano de maíz a cosecha y EUA.

- No hubo diferencias en consumo de agua en el suelo, con una mayor eficiencia en kg ha^{-1} producidos por mm de agua consumido.
- La inclusión de vicia como cultivo de cobertura o abono verde generó significativos aumentos de rendimiento de grano y biomasa de maíz, respecto de los testigos sin vicia. Se observaron mejores eficiencias en el uso del agua con la inclusión de CC o AV.
- Si bien la aplicación de la tecnología de AV o CC fue evaluada solamente en un ciclo del cultivo, es de esperar que los efectos a largo plazo mejoren las propiedades fisicoquímicas de los suelos.

Fijadores No simbióticos: La EEA Anguil, INTA a realizado ensayos en trigo y girasol desde hace varios años con promotores de crecimiento. Los mismos han contribuido a mejorar la eficiencia del uso de fertilizantes de síntesis, posiblemente por un incremento en el desarrollo radicular mejorando la absorción de agua y nutrientes en especial P.

Momentos de aplicación de nitrógeno
A la siembra o presiembra: Puede ser al voleo o en la línea de siembra.

Postergado: al macollaje en trigo o cereales de invierno y 2-4 pares de hojas en maíz y girasol. Aunque hay años y/o lotes que favorecen las aplicaciones de fertilizante a la siembra y otros al macollaje o en ambos momentos, la respuesta productiva, en promedio suele ser similar. Existen factores agronómicos y operativos que pueden justificar técnicamente cada alternativa (siembra y macollaje), sin excluir el fraccionamiento. Por ejemplo al macollaje se pueden observar síntomas visuales del cultivo y reservas hídricas que permitan modificar dosis o tomar la decisión de fertilizar o no, mientras que con alta deficiencia inicial de N en el suelo y alta reserva de agua y aplicación de P (mayor interacción) es conveniente fertilizar a la siembra.

Fraccionado: Una parte a la siembra y la otra postergada (macollaje o 2-4 pares de hojas según el cultivo). Es común en casos donde se realiza una fertilización con N + P a la siembra y luego con condiciones favorables de clima se completa la dosis de N en forma postergada.

Perdidas de nitrógeno
Desnitrificación: Es despreciable en los suelos cuando su humedad está por debajo del 60 % de la capacidad de retención hídrica. En los Molisoles pampeanos se ha observado que el proceso es de escasa magnitud con contenidos de agua inferiores al 30 %, acelerándose exponencialmente al aumentar humedad (Giambiagi et al. 1990). La información existente es escasa para determinar factores de corrección de dosis de fertilizante. Sería adecuado por el momento considerar las pérdidas por desnitrificación como nulas bajo labranza convencional y de alrededor del 5 % SD.

Lixiviación: La concentración de nitratos en el suelo decrece con la profundidad, por lo tanto es un fenómeno general en la región pampeana encontrar mayor concentración cerca de la superficie del suelo. Por otro lado, en la región pampeana se ha establecido para los distintos cultivos (maíz, trigo girasol) que pueden absorber agua de 0.80 m hasta 2 m de profundidad (suelos arcillos a arenosos) durante la floración, momento de máxima biomasa y profundidad de raíces. En general, las mayores pérdidas por lixiviación de nitratos podrían ocurrir con altas fertilizaciones y precipitaciones y bajo consumos de los cultivos (estados iniciales).

Volatilización: Revisiones bibliográficas indican que la volatilización en suelos agrícolas bien drenados es pequeña cuando se aplican fertilizantes en forma de nitratos. Es muy escasa la información sobre volatilización en suelos pampeanos, siendo casi todos los datos publicados al respecto generados

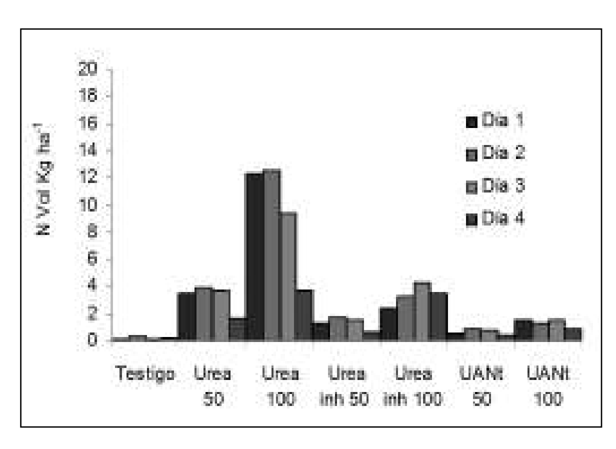


Figura 5. Perdidas diarias de N-NH3 por volatilización en los diferentes tratamientos realizados. Las dosis estan expresadas en kg ha-1 de N. Urea inh (urea con inhibidor nBTPT), UANt (urea + nitrato de amonio + tiosulfato de amonio). Romano y Bono 2012.

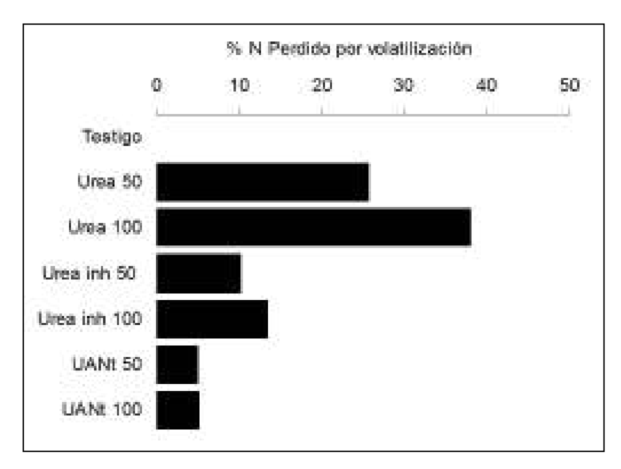


Figura 6. Porcentaje de pérdida de N por volatilización en los diferentes tratamientos realizados. Urea inh (urea con inhibidor nBTPT), UANt (urea + nitrato de amonio + tiosulfato de amonio). Romano y Bono 2012.

por INTA Balcarce. Cuando los fertilizantes son incorporados, las pérdidas por volatilización son bajas tanto en trigo como en maíz y están en el orden de magnitud de los aportes de N por las lluvias. Cuando los fertilizantes no son incorporados la volatilización podría representar de un 5 a 10 % del N agregado. Sin embargo en la campaña 2010-11 en Anguil, La Pampa, las perdidas por volatilización de N fueron muy superiores a esos valores. En esta experiencia se utilizaron distintas fuentes nitrogenadas aplicadas al voleo sobre un maíz tardío. Las condiciones de altas temperaturas y humedad de esa campaña fueron factores claves para que las pérdidas se magnifiquen. Los dos primeros días de medición el tratamiento de 100 kg ha^{-1} de N en forma de urea generó la mayor tasa de volatilización de N respecto a los demás tratamientos ($p<0.05$), Figura 5. A partir del tercer día, las tasas de volatilización descendieron y solo se presentaron diferencias significativas entre el tratamiento Urea y UAN+Tios (UAN + Tiosulfato de amonio) a una dosis de 100 kg ha^{-1} de N. Al cuarto día ya no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p<0.05$). La magnitud en las pérdidas de N por volatilización dependió de la cantidad de N aplicada.

A mayor dosis de N las perdidas por volatilización se incrementaron de manera importante, Figura 6. Se alcanzaron perdidas cercanas al 40 % del N aplicado cuando se utilizo la fuente urea a una dosis de 100 kg ha^{-1} N, Figura 6. La utilización de urea con inhibidor de ureasa (Urea inh) redujo en más de un 50% las perdidas de N.

Bibliografía

- Alvarez R. 1999. Uso de modelos de balance para determinar los requerimientos de fertilizante nitrogenado de trigo y maíz. EUDEBA. 58 pp.
- Bono A. y M. Fagioli. 1994. Eficiencia de la alfalfa en la recuperación de la fertilidad nitrogenada del suelo en la región semiárida pampeana. Boletín Técnico Nº 45. EEA Anguil INTA.
- Brenzoni E. y E. Rivero. 1999. Fijación biológica de N2 en alfalfa, en diferentes suelos de la región pampeana argentina. XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Pucón, Chile.
- Falcone J. M. 2012. Evaluación de la sincronización en la liberación de nitrógeno en cultivos de cobertura y abonos verdes sobre el cultivo de maíz. Trabajo Final de Graduación. Fac. Agronomía UNLPam.
- Giambiagi N., M. Rimolo y V. Bianchi. 1990. Desnitrificación en suelos Molisoles de la Pradera Pampeana. Ciencia del Suelo 8: 161:166.
- Romano N. F. y A. Bono. 2012. Pérdidas por volatilización y eficiencias de uso del nitrógeno en maíz tardío. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo, Mar del Plata, Argentina. Actas de Congreso.

Alfredo Bono y Nicolás Romano

Fósforo

Ciclo

El fósforo (P), después del nitrógeno (N), es el nutriente que más frecuentemente afecta la producción de los cultivos. El P forma parte de enzimas, ácidos nucleicos y proteínas y esta involucrado en prácticamente todos los procesos de transferencia de energía. El contenido de P en el suelo está definido por el material madre y, en general, se ha observado un marcado efecto del clima, siendo las zonas más húmedas, las más deficientes en este nutriente (Tisdale et al. 1993). El P es uno de los nutrientes considerados esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Junto con el N y el potasio (K) conforman el grupo de macronutrientes por las cantidades requeridas por los cultivos y por la frecuencia con que se encuentran en cantidades deficientes para los cultivos (García 2001). El P integra todas las cadenas alimenticias pasando de un organismo a otro. El hombre adquiere el P de las plantas, las que directa o indirectamente a través de los alimentos de origen animal, provee los alimentos que ingerimos. Las plantas a su vez, lo toman de la solución del suelo. Normalmente esta solución del suelo es demasiado pobre para sostener un cultivo y debe ser realimentada continuamente de las formas más insolubles de P del suelo, a medida que los cultivos extraen. La mayor parte de los suelos agrícolas son demasiado pobres como para sostener este proceso y precisan de la fertilización (Hedley et al. 1982).

El fosfato es un componente vital de todos los seres vivos. En el cuerpo humano el P es el segundo nutriente mineral más abundante. Un 80% del P en los humanos es retenido en huesos y dientes, alcanzando un 20% del total de la composición del cuerpo. El resto es ampliamente distribuido en grasas, proteínas, azúcares, enzimas y sales asociados a cada célula de nuestro cuerpo. En las plantas el P es necesario para la respiración, fotosíntesis, funcionamiento celular y en la transferencia y reproducción de genes (Stauffer y Sulewsk 2001).

El P se absorbe principalmente por las raíces desde la solución del suelo como iones ortofosfato ($H_2PO_4^-$ y en menor medida como HPO_4^{2-}). Las

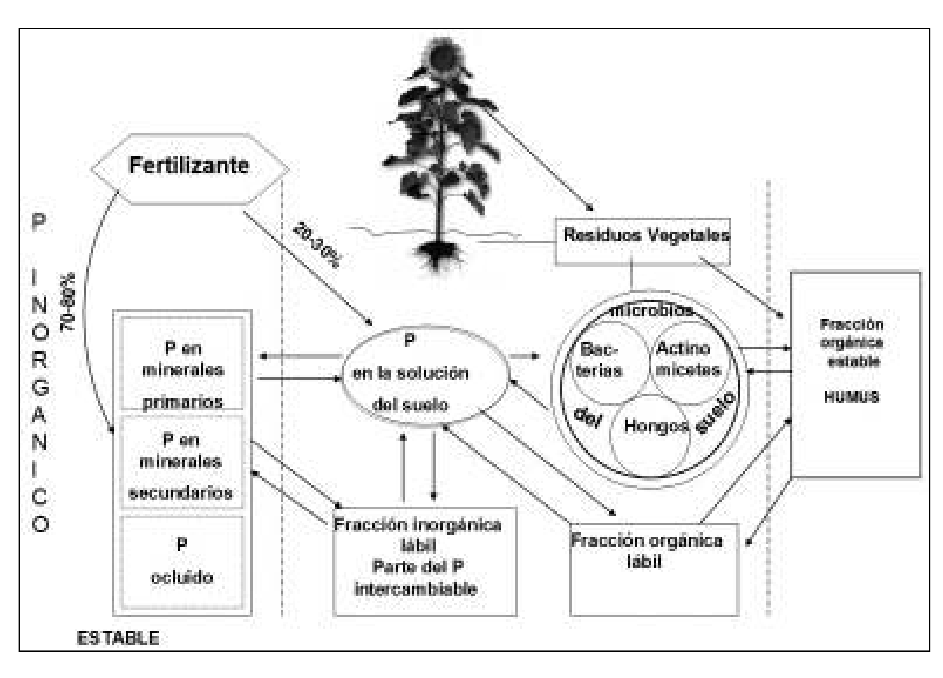


Figura 1. Ciclo del P en el sistema suelo-planta (Stewart y Sharpley 1987).

plantas en crecimiento no almacenan iones fosfatos, exigiendo una abundante provisión desde el suelo. Por supuesto las plantas que no obtienen de manera suficiente el P necesario, sufren importantes retardos en su crecimiento. Los síntomas más típicos son la coloración verde oscura-azulada en los cereales, disminución de la tasa de formación de frutos y semillas, y un retraso en la maduración y finalización del ciclo. Los cultivos de alta producción demandan una gran cantidad de P, un factor clave para lograr alto rendimientos es mantener a toda la planta bien nutrida de P. La producción sustentable de cultivos requiere programas de fertilización fosforada que sean capaces al menos de responder las cantidades extraídas de los campos (Johnston 2000).

Del P total del suelo, sólo las fracciones solubles y lábiles (inorgánicas y orgánicas), están disponible para las plantas durante el ciclo del cultivo. Una pequeña parte de P está en forma soluble, la cual está en equilibrio con la fracción lábil que comprende el P orgánico fácilmente mineralizable y los fosfatos débilmente adsorbidos a las arcillas coloidales. La mayor parte del P del suelo está en formas insolubles o fijadas, principalmente como minerales primarios fosfatados, humus, fosfatos insolubles de Ca, Fe y Al, y fosfatos fijados por los óxidos y minerales silicatados (Tisdale et al. 1993).

Casi todo el P en los suelos está como fosfato, el fosfato inorgánico esta ligado al calcio en suelos jóvenes y al hierro en suelos más viejos, éstas uniones elementales son al largo plazo importantes para los cultivos porque tienen diferentes solubilidades y disponibilidades de compuestos de P, en el corto plazo, la absorción del P puede predominar sobre la precipitación que controlan la solubilidad. Un esquema simplificado del ciclo del P en el sistema suelo-planta se muestra en la Figura 1.

La respuesta de los cultivos a la fertilización fosfatada depende del nivel de P disponible en suelo pero también es afectada por factores del suelo, del cultivo y del manejo del fertilizante. Entre los factores del suelo, se destacan la textura, la temperatura, el contenido de materia orgánica (MO) y el pH; mientras que entre los del cultivo deben mencionarse los requerimientos y el nivel de rendimiento (Selles et al. 1997).

Cuando aplicamos fertilizante fosfatados este se difunde en el suelo y si no es absorbido por las raíces de las plantas, será absorbido por las partículas del suelo o precipitará de manera que su disponibilidad se reducirá en el tiempo. La cantidad de P total en los suelos es muy superior a lo que necesitan los cultivos, pero la baja solubilidad de P y los sitios de absorción que compiten por P con las plantas generan una baja disponibilidad. Cuando los suelos son cultivados esta baja disponibilidad se traduce en una deficiencia de P que tendrá que ser compensada con una fertilización. El resto de P no aprovechado por el cultivo, que se aplica como fertilizante contribuye a aumentar la reserva del suelo, pero son de lenta residualidad. Esta última disminuye progresivamente en el tiempo. La aplicación de P en un cultivo no es absorbido totalmente ni desaprovechado para otros cultivos siguientes. Cuanto mayor es la dosis aplicada, más P queda disponible para la rotación siguiente (Vernet 2003). En nutrientes como el P de poca movilidad en la solución del suelo, se pueden aprovechar los efectos residuales en los cultivos posteriores de una secuencia existiendo evidencias que muestran que estos efectos residuales pueden observarse mas allá del cultivo siguiente (Fontanetto et al. 2003).

La concentración de P en la solución del suelo es muy baja (1 al 10 % del P total), por lo tanto el P absorbido por las raíces debe ser continuamente reabastecido. La cantidad de P en la solución del suelo es generalmente 100 veces menor que la cantidad disponible oscilando entre 0.1 y 0.6 kg ha^{-1} para la capa arable. La concentración de la solución del suelo es mantenida por la desorción u disolución química, pero también por procesos biológicos que liberan P de la MO. El P orgánico en la región pampeana comprende entre un 40 y 70% del P total del suelo, es originado a partir de los residuos de las plantas, animales y microbios (Figura 2). Gran parte de los residuos contienen P rápidamente disponible y lixiviable. De un 60 a 90% del P absorbido por una pastura es reciclado al suelo por las plantas y animales (Haynes y Williams 1991), pero esta proporción de reciclaje de nutrientes es mucho menor en suelos bajo cultivo de cosecha, ejemplo el trigo.

La mineralización del P orgánico proveniente de la MO representa una contribución significativa para las necesidades de P para la plantas. La mineralización y disponibilidad del P orgánico depende de la descomposición de la MO. Cualquier reducción en el aporte de MO y una aceleración de la mineralización

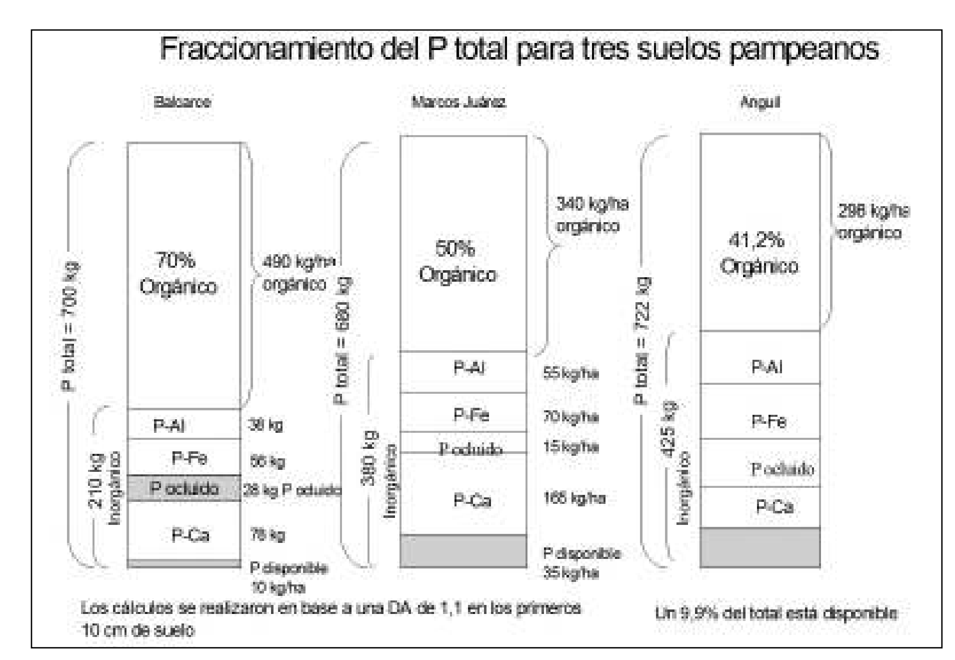


Figura 2. Fraccionamiento del P total en Balcarce, Marcos Juárez y Anguil. Los tres suelos tienen similar cantidad de P total, pero distintas cantidades en sus fracciones orgánicas e inorgánicas (Navarro 1973, Hepper et al. 1996, Salas et al. 2003).

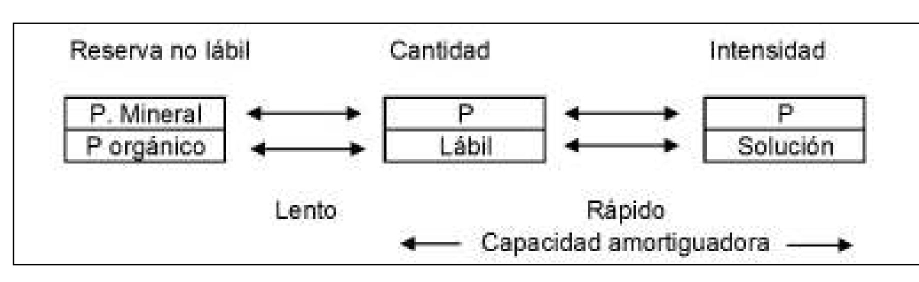


Figura 3. El nivel de P en la solución del suelo, está en equilibrio con la demanda y el P, retenido en los sólidos (intensidad vs. Cantidad). Larsen 1967

en un suelo resulta en una mineralización neta de la MO del suelo. A medida que los residuos se descomponen para formar MO y liberar algunos de los nutrientes asociados, el P es liberado en cantidades mayores que aquellas determinadas por las transformaciones inorgánicas de P. Entonces la degradación de la MO controla la liberación de P orgánico, pero una vez liberado, los sitios de absorción y las reacciones químicas compiten por la disponibilidad del P liberado de manera que la mineralización de P por si sola no es una medida del abastecimiento de P para las plantas y gran parte del P mineralizado rápidamente queda no disponible.

Si el flujo o reabastecimiento se interrumpe el rendimiento del cultivo no será el máximo. La Figura 3 muestra un modelo simplificado por Larsen (1967) donde hay una doble flecha entre el P en solución y el P en la fase sólida del suelo lo cual indica una situación de equilibrio o sea una liberación de iones fosfatos hacia la solución del suelo. Si los iones fosfatos no son absorbidos por los vegetales llegará un punto en el cual éstos se fijarán quedando sorbidos o absorbidos sobre la fase sólida (fechas hacia la izquierda). Este equilibrio está gobernado entre otros factores por la oferta de P en la fase sólida y la demanda de los vegetales, la temperatura, el pH la actividad microbiana, tipo de arcillas que determinarán la cantidad de P en la solución y la tasa de reposición. La concentración de un nutriente en la solución del suelo representa la intensidad del mismo, en este caso los fosfatos en solución. La cantidad del elemento que está en la fase sólida, en equilibrio con la solución, es el factor Cantidad. La relación dinámica entre la cantidad y la intensidad es conocida como Capacidad buffer o amortiguadora. Esta es una propiedad que posee un suelo para resistir los cambios en la concentración de P en solución (Quintero 2002).

En los suelos de la región pampeana, la principal región productora de granos del país, muestran una continua disminución en los niveles de P disponible, ésta disminución ha sido atribuida a la mayor producción de granos y el reducido uso de fertilizantes fosfatados. El balance de P de los suelos pampeanos, determinados como la diferencia entre el P exportado en granos y el P aplicados con los fertili-

zantes, sigue siendo ampliamente negativo a pesar del incremento de usos de fertilizantes observado en la última década (García 2001).

Niveles de P asimilable en la Región Semiárida Pampeana (RSP)

En los suelos de la región pampeana, la principal región productora de granos del país, muestran una continua disminución en los niveles de P asimilable, ésta disminución ha sido atribuida a la mayor producción de granos y el reducido uso de fertilizantes fosfatados. El balance de P de los suelos pampeanos, determinados como la diferencia entre el P exportado en granos y el P aplicado con los fertilizantes, sigue siendo ampliamente negativo a pesar del incremento de usos de fertilizantes observado en la última década (García 2001). En la RSP no se presenta una generalizada limitación de P asimilable. La zona con grandes limitaciones de P asimilable es la que incluye los departamentos de Guatraché y Hucal (Figura 4). Otras zonas que comienzan a presentar bajos niveles de P asimilable son la Planicie medanosa sur, la cual incluye los departamentos de Catriló y norte de Atreucó, y en la Planicie con tosca, los departamentos de Conhelo y Trenél (Romano y Roberto 2007).

La problemática de estas zonas "criticas" se debe a que la cantidad de nutriente, en este caso P, que sale del sistema por la cosecha de granos, henos o pastoreo, es de mayor magnitud a sus posibles vías de entradas, principalmente por fertilización. A modo ejemplo, en la planicie medanosa sur un cultivo muy frecuente en la rotación es el girasol. Las dosis comúnmente usadas para la fertilización del girasol es de 50 kg ha^{-1} de fosfato diamónico. Teniendo en cuenta un rendimiento normal de la zona de 2000 kg grano por hectárea (7 kg de P t $grano^{-1}$), se esta reponiendo un 75 % del P que sale del sistema. Esto es aún más grave en una situación totalmente extractiva cómo la confección de henos, en donde el balance negativo de nutrientes es de mayor magnitud.

De todas maneras hoy es esperable encontrar zonas con suficiencia de P en un gran número de situaciones, donde no se presentan respuestas a la fertilización con este nutriente. Por ejemplo, en los estudios realizados en trigo por Bono y Alvarez (2009) no hubo respuesta a P, mientras en girasol (Bono y

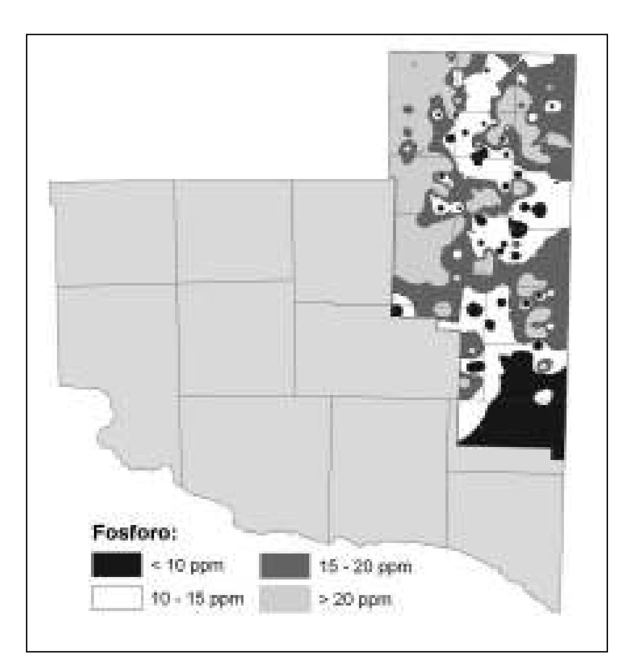


Figura 4. Contenidos de P asimilable en la Región este de la provincia de La Pampa.

Alvarez 2007) la respuesta a P fue muy baja. Sin embargo, los requerimientos altos de este nutriente en cultivos como la alfalfa hacen necesario mantener niveles medios a altos de P en el suelo en sistemas mixtos de la RSP.

Momentos y formas de aplicación de fósforo

Al momento de realizar la fertilización fosforada el productor muchas veces se le presenta el interrogante de cómo aplicar el fertilizante fosforado. Se ha sugerido que la respuesta a la fertilización fosforada aplicada en la línea es probablemente superior a la aplicación al voleo, principalmente cuando los suelos son deficientes en P, o cuando los suelos presentan alta capacidad de fijación de P (Mallarino 1997).

La respuesta a la fertilización con P depende del tipo de cultivo, clima y características del suelo (Stewart 2003). Dada la baja movilidad de este nutriente es que factores tales como humedad, pH y temperatura determinan su disponibilidad. Según un estudio presentado por Valetti et al. (1995) en girasol, la longitud de las raíces secundarias en estado de 8 hojas fue de 178,8 cm en el tratamiento con 50 kg/ha de superfosfato triple (SFT), mientras en el testigo sólo se extendieron 62,3 cm. Otro aspecto beneficioso del agregado de P es el aumento en la velocidad de implantación y en el desarrollo del área foliar del cultivo.

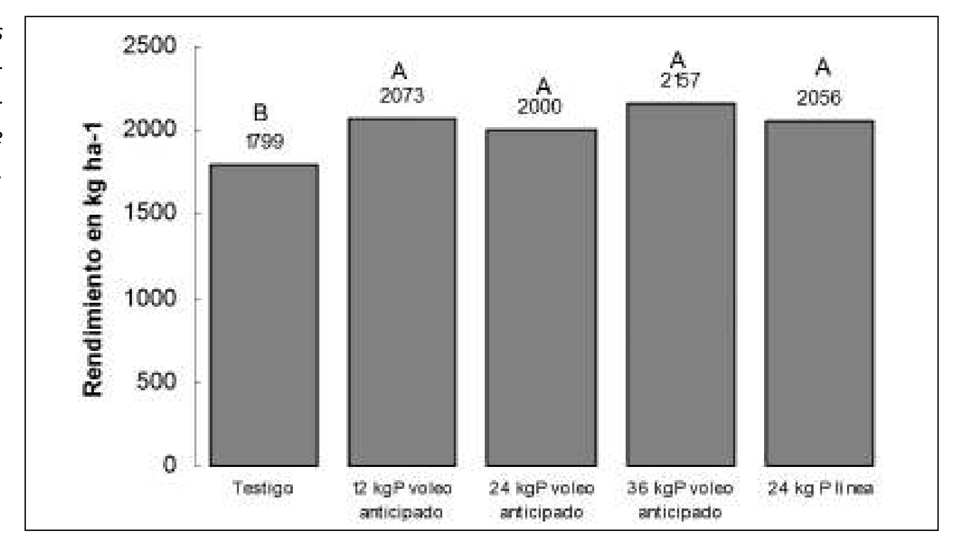


Figura 5. Rendimientos promedio de nueve ensayos en trigo de los diferentes tratamientos de fertilización realizados.

Cómo se discutió anteriormente, los niveles de P en la región se presentan "momentáneamente" dentro del rango de buena disponibilidad y además, los suelos de la RSP no presentan alta capacidad de fijación de fosfatos. Por lo tanto la forma de aplicación del P no tendría efecto significativo en la respuesta a la fertilización con P.

En muchos casos su aplicación se ha realizado por debajo de la línea de siembra. Otra práctica es la fertilización profunda, según Valetti y Migasso (1982) sería beneficiosa en comparación fertilizaciones convencionales en la línea de siembra. Una explicación de este comportamiento sería de disponer de mayor humedad en suelo para solubilizar el fertilizante y facilitar la captación por la planta. También, se han usado tradicionalmente fertilizaciones a la siembra, al voleo o en la línea; o bien cortamente anticipada antes de la siembra. Buscando aumentar la eficiencia en la captación de este nutriente por parte del cultivo se han probado recientemente fertilizaciones anticipadas durante el barbecho en SD de maíz y soja en Iowa (Mallarino 2001). Otros trabajos exploratorios en la Región Pampeana han mostrado buenos resultados para las aplicaciones anticipadas de P al voleo bajo SD en trigo (Bianchini 2003) y en maíz (Barbagelata y Paparotti 2000).

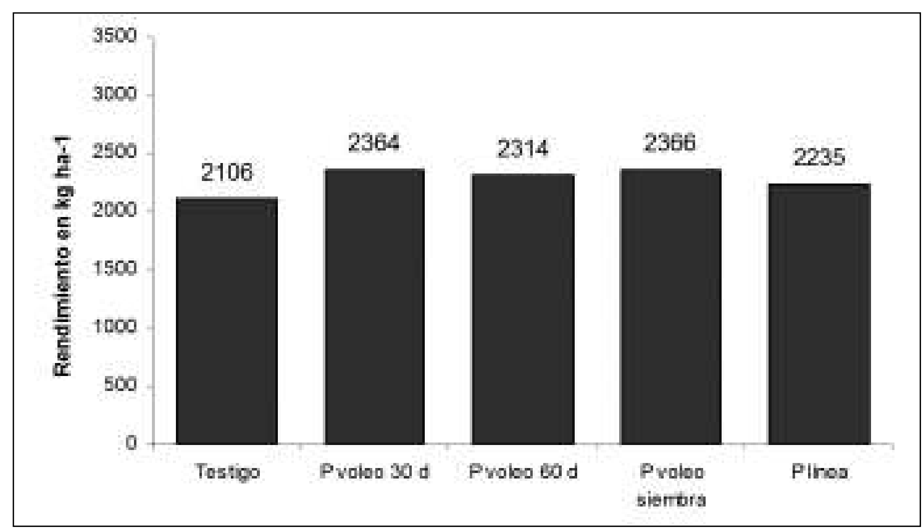
En la RSP se realizaron experiencias desde las campañas 2006/07 a la 2011/12 en siembra directa para evaluar el efecto de la forma de aplicación de P. Para esto se realizaron fertilizaciones al voleo anticipadas, aproximadamente 60 días antes de la siembra de trigo y maíz y otro tratamiento en la línea de siembra. Para las aplicaciones al voleo anticipadas se utilizaron tres dosis de P, 12, 24 y 36 kg P ha^{-1}. La dosis utilizada en la línea fue de 24 kg P ha^{-1}.

Si bien el rango de P de los sitios de la experiencia en trigo fue de 6 a 19 ppm, no se presentaron respuestas estadísticamente significativas al agregado del nutriente en algunos sitios. Sin embargo, hubo una respuesta promedio de los nueve sitios, la misma fue del orden de los 200 kg de grano ha^{-1} entre algunas dosis y formas y momentos de aplicación con relación al testigo. No se observaron diferencias en la forma de aplicación y dosis del nutriente (Figura 5).

Un aspecto a tener en cuenta al momento de planificar una fertilización anticipada de P es el tiempo desde la aplicación del nutriente hasta el momento de la siembra del cultivo. Una situación ideal sería aplicarlo entre 90 y 60 días antes de la siembra del trigo, aprovechando de esta manera las lluvias otoñales. De esta manera el P aplicado estará disponible para las raíces superficiales del cultivo. En el cultivo de maíz se realizaron diez ensayos, el rango de valores de P asimilable fue de 6 a 21 ppm (mg kg^{-1}) y no hubo respuesta a la aplicación de P.

Durante las campañas 2005/06 y 2006/07 se establecieron 9 ensayos de girasol en el Sur de San Luís, Sur de Córdoba, Este de La Pampa y C. Suárez, en siembra directa. Los ensayos se localizaron en suelos Molisoles y Entisoles con distintos niveles de P asimilable de 7.5 a 68.3 ppm y contenidos MO de 0.47 a 3.30 %. Se aplicó P como SFT en una dosis de 20 kg P ha^{-1} al voleo anticipado en los barbechos (30 y 60 días antes de la siembra); y a la siembra aplica-

Figura 6. Efecto del momento y formas de aplicación de P asimilable sobre el rendimiento en grano de girasol. Promedio de 9 ensayos realizados en 2005/06 y 2006/07 en RSSP).



do en la línea y al voleo. Para los niveles de P y tipo de suelo bajo estudio, no hubo diferencias entre los momentos y formas de aplicación de P, pero hubo diferencias significativas ($P<0.01$) entre los momentos y formas de aplicación de P con respecto al testigo sin fertilizar (Figura 6) (Bono et al. 2007).

Dosis umbral de P

Hasta el momento el diagnostico para determinar la necesidad de aplicar un fertilizante fosforado se basa en el análisis de suelo en el horizonte superficial (generalmente los primeros 20 cm) y la técnica de laboratorio para determinar P asimilable por las plantas es Bray I (Bray y Kurtz 1945). Por otro lado, el umbral crítico de un nutriente en el suelo es el valor de disponibilidad que separa el nivel de deficiencia del de suficiencia. Para el caso de soja y girasol, los umbrales críticos oscilan entre 9 y 13, para el caso de trigo entre 8 y 20 y maíz entre 14 y 19 mg kg^{-1} (Bray 1) (Barberis et al. 1987, Blanco et al. 2004, Echeverría y García 1998, García 2003, Ron y Loewy 2000).

Para hallar los valores críticos de P asimilable, por debajo de los cuales se considera rentable la fertilización del trigo, encontramos un amplio rango de valores, dependientes de la región en estudio (Tabla 1).

Como alcanzar un valor umbral de P en ppm

Por ejemplo un lote con 12 ppm de P, para llevarlo a un valor umbral de 18 ppm, se necesita aumentar 6 ppm mediante la práctica de fertilización. Ahora para calcular cuantos kg de P ha^{-1} debo agregar para elevar 1 ppm el P asimilable, Rubio et al. (2008) calcularon en base a 71 suelos de la región pampeana, el aumento de P asimilable luego de aplicar diferentes dosis de P. En base a esta experiencia se obtuvo un modelo de predicción de un coeficiente b, cuya definición se detalla en la siguiente expresión:

$$\text{Coef b} = \frac{\text{Variación de P as en el suelo (ppm)}}{\text{ppm de P adicionado Kg}^{-1}}$$

El valor de b para los suelos estudiados, oscilo entre 0,27 y 0,74, con un valor promedio de 0,52.

Tabla 1. Valores críticos dependiendo de las áreas de estudio y textura y sistemas de labranza.

Area	Nivel critico ppm	Condiciones	Referencia
Sudeste de Buenos Aires	15	LC	Berardo, 1994.
Sudoeste de Buenos Aires	8	textura fina	Ron y Loewy, 1996.
	11	textura gruesa	Ron y Loewy, 1996.
Balcarce	20	LC	Berardo y col., 1999.
Sudeste de Buenos Aires	14	SD	Zamuner y col., 2004.
Sur de Santa Fe	14	SD	Recopilación de varios ensayos

Teniendo en cuenta esta información y contando con la información de la Dap (densidad aparente) y la profundidad de muestreo podemos calcular la dosis de fertilizante a aplicar para elevar el nivel de Pas en 1 ppm.

$$\text{Dosis de P (kg/ha) para elevar Pas en 1 ppm} = \frac{[\,0{,}1 * \text{D ap (tn m}^{-3}) * \text{prof (cm)}\,]}{\text{Coef b}}$$

A modo de ejemplo práctico a continuación se detalla un esquema básico de fertilización en base al criterio de suficiencia (Figura 7).

Sitio: Maisonave, La Pampa
Pas: 13,53 ppm
Dap: 1,3 ton m^{-3}
Coef b: 0,52 (según Rubio et al.2008)

Dosis para elevar Pas en 1 ppm (kg P fertilizante/ha)

$$\text{Kg ha}^{-1} = \frac{0{,}1*1{,}3 \text{ ton m}^{-3} + 20 \text{ cm}}{\text{coef b}}$$

↓

$$\text{Kg ha}^{-1} = \frac{2{,}6}{0{,}52}$$

↓

Kg ha^{-1} = **5**

(*) Umbral de P a alcanzar: 16 ppm
Incremento necesario en Pas : 16-13,53 = **2,47ppm**

Dosis recomendada (5 * 2,47) = 12,35 kg P ha^{-1}

(*)Valor tomado en base a las experiencias realizadas en la región pampeana.

Figura 7. Esquema de fertilización con P utilizando el criterio de suficiencia para un lote de la localidad de Maisonave, La Pampa.

Estrategias de fertilización fosfóricas

Recomendaciones de fertilización fosforada en la RSP

En el caso de P se presentan tres criterios de fertilización: el de suficiencia, reposición y el de reposición y construcción (Ciampitti 2009). A nivel general el criterio de suficiencia se basa en la fertilización para satisfacer el cultivo inmediato, en donde el nivel de P asimilable del suelo es menor al valor umbral de P. Mediante esta estrategia de fertilización el nivel de P asimilable del suelo permanecerá cercano al valor umbral y no tiene en cuenta un rendimiento objetivo o promedio del lote. Este criterio de fertilización es utilizado para sistemas cortoplacistas, cómo arrendamientos de una sola campaña, donde las respuestas económicas juegan un rol muy importante.

En el caso del criterio de reposición se utilizan dosis en base a lo que extrae el cultivo. En estos casos el diagnostico se realiza por cultivo o por la rotación agrícola que se plantea. El cultivo de trigo extrae aproximadamente 4 kg de P por tonelada de grano cosechada, el maíz 3 kg de P t de grano^{-1} y el girasol 7 kg de P t de grano^{-1}. Teniendo en cuenta un rendimiento objetivo en base a la experiencia zonal se determina la dosis de fertilizante fosforado a aplicar. Por último, en el enfoque de reposición y construcción, no solo se repone el P extraído por el cultivo sino que se agrega un poco más de modo tal de elevar el nivel de nutriente en el suelo. A nivel general tanto el criterio de reposición, cómo el de reposición y construcción son utilizados para planteos a largo plazo. Generalmente se piensa en una fertilización fosforada para la rotación y no para un solo cultivo.

En la RSP hay una recomendación generalizada de fertilizar con FDA a la siembra dependiendo de los niveles de N orgánico o N de nitratos agregar más N o en algún momento del ciclo del cultivo. Se pone mucho énfasis a los niveles de N, en muchos casos, se recomienda aumentar la dosis de N (llevarla a 50 a 80 kg de N ha^{-1}) usando además urea, a la siembra

Tabla 2. Dosis orientativas de fertilizacíon con superfosfato triple (kg ha^{-1}) para obtener una máxima producción de alfalfa. Refertilización en suelos con P menor a 14 ppm. (Quintero et al. 1997).

P disponible (ppm)	Tipo de suelo		
	Franco arenoso a arenoso (menos de 10 % de arcilla)	Franco a franco limoso (10 a 30 % de arcilla)	Franco arcilloso (menos de 30 % de arcilla)
		Kg ha^{-1} de SFT	
Menos de 5	Más de 250	Más de 300	Más de 360
5-12	250-160	300-200	360-230
12-18	160-90	200-100	230-130
18-25	Menos de 90	Menos de 100	Menos de 130
Refertilización	80	100	120

o postergada según el cultivo. En general, la decisión de fertilizar por debajo de 15 mg kg^{-1} de P asimilable en el suelo puede pasar más por la intención de mantener un buen nivel de P. La dosis de P depende también de la forma de aplicación, en línea incorporada, al voleo y voleo incorporada. Por consiguiente, se recomienda aumentar la dosis cuando la aplicación es al voleo y no se incorpora.

Para suelos de Entre Ríos, Quintero et al. (1997) establecieron dosis orientativas de P para pasturas, de acuerdo a la textura y niveles de P en el suelo (Tabla 2). A medida que los suelos tienen mayor cantidad de arcilla hay una mayor proporción de P del fertilizante que es retenido por el suelo.

Bibliografía

• Barbagelata P., O. Paparotti. 2000. Estrategias de fertilización fosforada del maíz en siembra directa. Jornadas de Intercambio Técnico de Maíz. AAPRESID. Rosario. Santa Fé.

• Barberis L. A., Duarte G., A. Sfeir, L. Marban, y M. Vazquez. 1987. Respuesta de trigo a la fertilización fosforada en la Pampa Arenosa Húmeda y su predicción. Ciencia del Suelo 5:166-174.

• Berardo A. 1994. Aspectos generales de fertilización y manejo de trigo en el área de influencia de la Estación Experimental INTA Balcarce. Boletín Técnico N°128.

• Berardo A, F. D. Grattone, G. Borrajo. 1999. Fertilización fosfatada de trigo. Respuesta y forma de aplicación. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. Nº 2. INPOFOS. Acassuso. Argentina.

• Bianchini A. 2003. Localización de fósforo en siembra directa. Simposio "El fósforo en la agricultura argentina". INPOFOS Cono Sur. 79-82 pp.

• Blanco H., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Houssay, G. Deza Marín, A. Berardo y F. García. 2004. Red nutricional CREA sur de Santa Fé. Informaciones Agropecuarias 23:9-14.

• Bono A. y R. Alvarez. 2007. Recomendaciones de fertilización para girasol en las regiónes semiárida y subhúmeda Pampeana. Informaciones Agronómicas 35: 1-5.

• Bono A., E. de Sá Pereira, N. Romano, J. Montoya. 2007. Girasol: Tiempo de barbecho y momentos y formas de aplicación de fósforo. IV Congreso Argentino de Girasol. Buenos Aires. Actas del Congreso.

• Bono A. y R. Alvarez. 2009. Rendimiento de trigo en la región semiárida y subhúmeda pampeana. Un modelo predictivo de la respuesta a la fertilización nitrogenada. Informaciones Agronómicas 41: 18-21.

• Bray R. H. y L. T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorous in soil. Soil Science 134: 376-380.

• Ciampitti I. A., G. Rubio, L. I. Picone, F. O. García. 2009. El fósforo en la agricultura: Simposio de Fertilidad 2009, "Mejores practicas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. IPNI-Fertilizar, pp 35-51.

• Echeverría H. y F. García. 1998. Guía para la fertilización fosforada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín Técnico 149. INTA. EEA Balcarce.

• Fontanetto H., H. Vivas, R. Albrecht y J. L. Hotian. 2003. La fertilización con N, P y S y su residualidad en un sistema agrícola de la Región Central de Santa Fe. 1- efecto sobre rendimientos de granos. Información técnica de los cultivos de verano. Campaña 20003. Publicación Miscelánea Nº 100. INTA Rafaela.

• García F. O. 2001. Balance del fósforo en los suelos de La Región Pampeana, Informaciones agronómicas del Cono Sur, 9: 1-3, INPOFOS.

• García F. O. 2003. El manejo de fósforo en la producción de trigo y maíz. Simposio. El fósforo en la agricultura argentina. INPOFOS, pág. 55-61.

• Haynes R. J. y P. H. Williams. 1991. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. Adv. Agron. 49, 119-199.

• Hedley M. J.; J. W. B.Stewart y B. S. Chauhan. 1982. Changes inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratority incubations. SOIL SCI. Soc. Am. J. 46: 970-976.

• Hepper E., G. Hevia, D. Buschiazzo, A. Urioste y A. Bono. 1996. Efectos de la agricultura sobre fracciones de fósforo en suelos de la región semiárida pampeana central. Ciencia de Suelo 14:96-99.

• Johnston A. E. 2000. Oklahoma Soil Fertility Handbouk. Oklahoma St, University. (Disponible on-line http://www.dasnr.okstate.edi/NPK).

• Larsen S. 1967. Soil phosphorus. Advan. Agron; 151-210.
Mallarino A. 1997. Manejo de fósforo, potasio y starters para maíz y soja en siembra directa. 5º Congreso nacional de AAPRESID. Mar del Plata. Agosto de 1997, pp 11-19.

• Mallarino A. 2001. Manejo de la fertilización con fósforo y potasio para maíz y soja en el centro-oeste de los Estados Unidos. Actas Jornada de Actualización Técnica para profesionales "Fertilidad 2001". INPOFOS Cono Sur. 2-7 pp.

• Navarro C. A. 1973. Contribution a l´ etude de l a mineralisation du phosphore organique dans des sols argentins et belges. Etude des systemes phosphatasiques de ces sols. These PhD. Faculte des Sciences Agronomiques de l' Etat Gembloux, Belgique.

• Quintero C. 2002. Dosificación del fósforo según tipos de suelos. Informaciones Agronómicas del Cono Sur Simposio.

“Enfoque sistémico de la fertilización fosfórica”. Nº 16. Diciembre 2002.
• Quintero C, N. G. Boschetti y R. A. Benavides. 1997. Efecto residual y refertilización fosfatada de pasturas implantadas en Entre Ríos. Ciencia del Suelo 15:1-5.
• Romano N. F y Z. Roberto. 2007. Contenido de Fósforo extractable, pH y Materia orgánica en los suelos del este de la provincia de La Pampa. Internacional Plant Nutrition Institute (IPNI), pag 1-6.
• Ron M. y T. Loewy. 2000. Modelo de fertilización nitrogenada y fosforada para trigo en el Sudoeste Bonaerense, Argentina. Ciencia del Suelo 18:44-49.
• Rubio G., M. J. Cabello, F. H. Gutiérrez Boem y E. Munaro. 2008. Estimating available soil P increases alter P additions in Mollisols. Soil Science Soc. America J. 72:1721-1727.
• Salas A. M., E. Elliot, D. Wesfall, C. Cole y J. Six. 2003. The role of particulate organic matter in phosphorus cycling. Soil Sci. Soc. Am. J. 67:161-189.
• Selles F. R., J. Kechhan, R. Dardin, Zenter y A. Faganello. 1997. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. Soil Tillage. 44: 23-24.
• Stauffer D. y G. Sulewsli. 2001. Fósforo: un nutriente esencial para la vida. Simposio: El fósforo en la agricultura Argentina. INPOFOS Cono Sur, pág.:4-7.
• Stewart J W. B. y A. Sharpley. N.1987. Controls on dynamics of soil and fertilizers phosphorus and sulfur. In: R. F. Follet y C.V. Core (eds.) Soil fertility and organic matter es critical components of production. SSSA Special Publication 19. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. p. 104-121.
• Stewart W. M. 2003. Nutrición fosforada en la producción de cultivos en el centro y sur de las grandes planicies de Estados Unidos. Simposio. El fósforo en la Agricultura Argentina. 8 y 9 de mayo de 2003. 27-33 pp.
• Tisdale S.; W. Nelson; J. Beaton y J. Havlin. 1993. Soil Fertility and Fertilizers. Ed: Macmillan Publishing Company. Chapter 10: 364-404.
• Valetti O y N. Migasso. 1982. Fertilización convencional y profunda en el cultivo de girasol. Oleico, 18:5-11.
• Valetti O., L. Iriarte, M. Borda, N. Migasso. 1995. Fertilización en girasol. Aspectos Generales a tener en cuenta. Chacra Exp. Integrada Barrow. Convenio: INTA-Centro Regional Buenos Aires Sur-Ministerio de la Provincia de Buenos Aires.
• Vernet E. 2003. Fertilización fosforada en pasturas. Manual de consulta de un Agropecuario página 79-80.

Nicolás Romano

Azufre

Ciclo

En la región Pampeana el azufre (S) constituye el tercer nutriente en importancia luego del nitrógeno (N) y fósforo (P) en la nutrición vegetal. Los requerimientos son similares a los de P, aunque considerablemente más bajos que N y potasio (K). El S participa en importantes procesos bioquímicos y fisiológicos en las plantas superiores como la biosíntesis de proteínas y lípidos, fotosíntesis, asimilación de N, fijación biológica de N, entre otras, (Torres Duggan 2011). Las raíces absorben S como sulfatos ($SO4^{2-}$) y se reduce dentro de la planta durante la síntesis de compuestos orgánicos. En la Figura 1 se presenta un esquema del ciclo del S, donde se observan las distintas vías de ingreso a suelo y perdidas. Este nutriente se encuentra en el suelo bajo diferentes formas químicas. El S cómo parte de compuestos orgánicos asociados con la materia orgánica (MO) del suelo y el S inorgánico, formando principalmente $SO4^{2-}$, el cual es la forma disponible para los cultivos.

Del S total del suelo, el 97% se encuentra bajo formas orgánicas y el 3% restante como formas inorgánicas. Estos conceptos indican claramente la importancia de la necesidad de que los suelos estén adecuadamente dotados de MO, para que los procesos de descomposición de la misma, entregue a los vegetales las cantidades necesarias de este nutriente.

Es común asociar al N con la MO y los procesos de descomposición que transforman al N orgánico en N mineral, asimilable por las plantas. Este mismo proceso es válido para el S. El contenido de S de los suelos es muy variable, los valores más bajos se encuentran en suelos arenosos (20 mg de S kg^{-1} de suelo), mientras que los valores más altos se encuentran en zonas de mareas donde el azufre tiende a acumularse (35000 mg de S kg^{-1} de suelo). Pero el rango normal en suelos agrícolas en regiones húmedas y semi húmedas es de 100 a 500 mg de S kg^{-1} de suelo, lo que equivale a 225 a 1120 kg ha^{-1} de este nutriente. El S presenta escasa movilidad den-

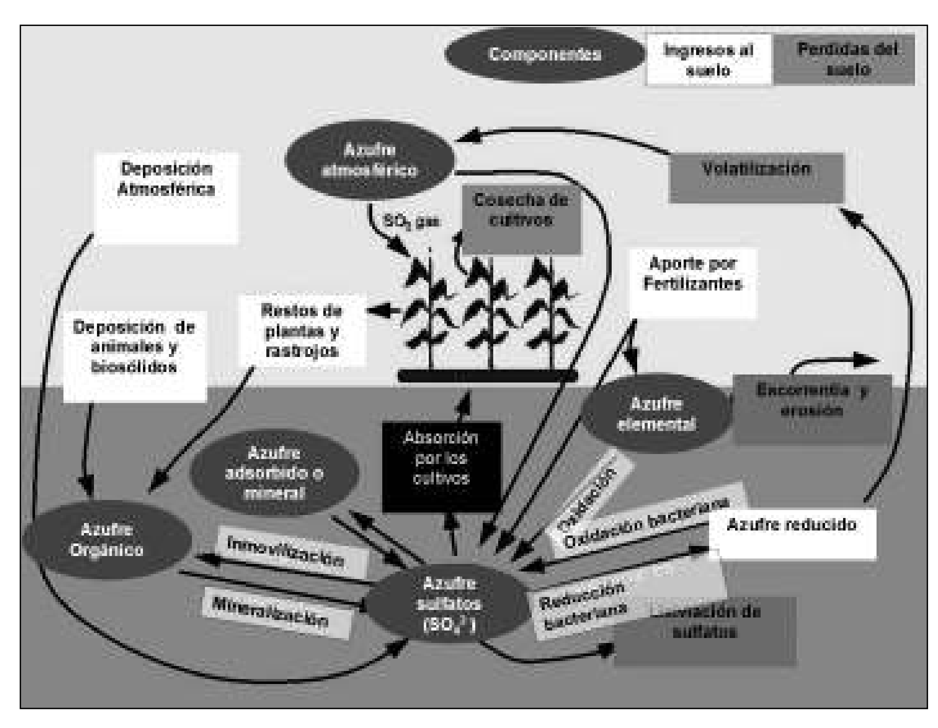


Figura 1. El ciclo de S en el suelo.

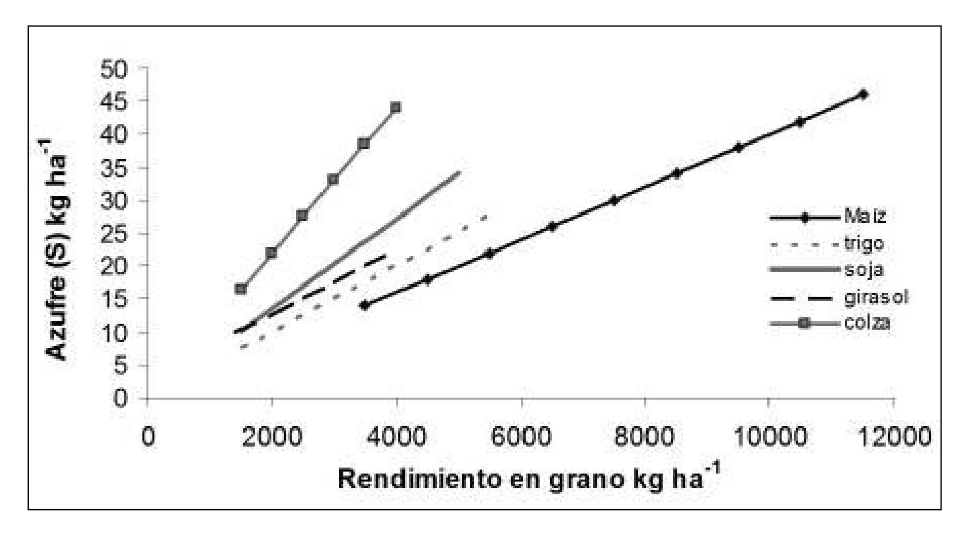


Figura 2. Requerimientos de S para distintos cultivos en función del rendimiento en grano en kg ha⁻¹. (Realizado con datos de Ciampitti y García 2007).

tro de la planta, determinando que los síntomas de deficiencia se observen en las hojas más nuevas.

Requerimientos de azufre por los cultivos

Los requerimientos de S por partes de los cultivos van del orden de los 4 a 18 kg S por tonelada de grano. Las oleaginosas son las más exigentes en S, en especial el cultivo de colza el cual requiere alrededor de 18 kg de S por tonelada, Figura 2. Los cereales cómo trigo y maíz requieren menor cantidad de S. Si tenemos en cuenta los altos niveles de rendimiento que puede alcanzar el maíz, estos niveles de S requeridos pueden llegar a ser muy altos.

Deficiencias de azufre y respuesta de los cultivos

Las deficiencias de S comenzaron a manifestarse y difundirse a nivel global hace relativamente pocos años, en regiones donde hasta hace poco tiempo la disponibilidad de este nutriente resultaba suficiente. Las principales razones son:

a) las regulaciones ambientales sobre las emisiones de SO2.
b) el incremento en la aplicación de fertilizantes con alto grado de otros nutrientes y bajo contenido de S.
c) el aumento en los rendimientos debido al uso de distintas tecnologías.

Las deficiencias y respuestas al agregado de S en la Argentina se han observado en soja, trigo y maíz, en lotes con prolongada historia agrícola, con bajos contenidos de MO y siembra directa (Echeverría

Tabla 1. Revisión de experimentos recientes en los cuales de realizó la evaluación de fuentes azufradas en la Región Pampeana de Argentina (Torres Duggan et al. 2010).

Cultivo	Fuente de S	Dosis Kg ha⁻¹ S	Respuesta en Grano Kg ha⁻¹ S	Efecto dosis	Efecto fuente	Referencia
Doble cultivo Trigo/soja 2°	Yeso	20 en secuencia o en cada cultivo (1)	Soja: 217-620 Trigo 130 (E)	no evaluado	no evaluado	Salvagiotti et al. (2004)
Trigo	Yeso	15	625	no evaluado	no evaluado	Reussi Calvo et al. (2006)
Soja	SA y Yeso	15	160-500	no evaluado	ns	Gutierrez Boem et al. (2007)
Trigo	SA, Yeso y SPS	15 y 30	495	ns	ns	Torres Dugan et al. (2006)
Trigo	AE micronizado	24 y 40	208-465	ns en 4 de 5 años	ns	Tysko y Rodriguez (2006)
Trigo	SA y AE micronizado	10 y 30 (año 1) 15 y 30 (año 2)	600-1400 (año 1 y 2)	ns	ns (2)	Torres Dugan et al. (2010)
Maiz	Yeso	8-20 según experimento	492-598-755 (3)	4	no evaluado	Pagani et al. (2004)

*Notas: s: diferencias significativas ($p<0.05$), ns: diferencias no significativas ($p>0.05$),
(E) cultivo con problemas de enfermedades. (1) 8 kg ha^{-1} en trigo y 12 kg ha^{-1} en soja 2°. (2) para la mayoría de los sitios-año. (3) respuestas medias de distintas dosis evaluadas en diferentes experimentos. (4) variable según experimento.

Fertilizante	Fórmula química	% de S	Forma S	Estado
Sulfato de amonio	$(NH4)_2 SO_4$	24	SO_4^{2-}	Sólido
Tiosulfato de amonio	$(NH4)_2 S2O_3$	26	$S_2O_3^{2-}$	Líquido
Sal de Epsom	$MgSO_4.7H2O$	13	SO_4^{2-}	Sólido
Yeso agrícola	$CaSO_4 .2H2O$	12-18	SO_4^{2-}	Sólido
Sulf. de magnesio hidratado	$Mg SO_4.H2O$	22	SO_4^{2-}	Sólido
Sulf. de magnesio anhidro	$Mg . SO_4$	26	SO_4^{2-}	Sólido
Sulpomag	K_2SO_4 2 $.MgSO_4$	22	SO_4^{2-}	Sólido
Sulfato de potasio	$K_2 SO_4$	18	SO_4^{2-}	Sólido
Azufre elemental	S^o	30-100	S^o	Sólido
Superfosfato simple	$Ca (H_2PO4)_2 + CaSO_4.2H_2O$	14	SO_4^{2-}	Sólido
Superfosfato triple	$Ca (H_2PO4)_2 + CaSO_4.2H_2O$	<1	SO_4^{2-}	Sólido

Tabla 2. Principales fuentes azufradas utilizadas en la agricultura. Torres Duggan et al. 2010.

2005; Gutiérrez Boem, 2006). A continuación se presenta una Tabla resumen con los experimentos recientes en fertilización azufrada.

Diagnostico de la fertilización azufrada

El diagnóstico de la fertilidad azufrada en suelos pampeanos es un tema que está en desarrollo quedando aún muchos aspectos centrales sin dilucidar. Hasta hoy se presentan dificultades en establecer relaciones significativas y estables entre las respuestas a la fertilización y el contenido de $S\text{-}SO4^{2-}$ en suelo a la siembra, para una amplia gama de condiciones edafoclimáticas. Sin embargo, existen algunos estudios puntuales que resultan alentadores. Así, una reciente y extensa red de experimentos de fertilización azufrada a campo llevada a cabo en 22 sitios del sur de Santa Fe durante cuatro campañas permitió establecer un umbral tentativo de 10 ppm de $S\text{-}SO4^{2-}$ (0-20 cm) para separar situaciones con y sin respuesta al agregado de S en trigo y soja de segunda (García et al. 2006). En la soja de segunda, se pudo establecer la relación entre las respuestas a la fertilización y el contenido de $S\text{-}SO4^{2}$ (0-20 cm) medido a la siembra del trigo precedente. Las dificultades para establecer relaciones estables entre las respuestas y el contenido de $S\text{-}SO4^{2}$ a la siembra de los cultivos obedecen a diferentes causas. Entre ellas, la presencia de $S\text{-}SO4^{2}$ por debajo de la profundidad de muestreo o en el agua de capas freáticas cercanas; errores en la determinación de la concentración de $S\text{-}SO4^{2}$ en los extractos de suelo (Gutiérrez Boem 2006).

En la Región Pampeana, las principales fuentes azufradas sólidas aplicadas en cultivos de granos son el sulfato de amonio (SA), yeso agrícola (YS) y superfosfato simple de calcio (SPS) (Torres Duggan 2011). EL SA también es una fuente nitrogenada (fertilizante compuesto), mientras que el SPS es una fuente fosfatada y azufrada. Como se menciono antes estos fertilizantes son todos solubles en agua y por ello en la bibliografía frecuentemente se utiliza el término “fuente sulfatada” o “fuente soluble” en forma indistinta, Tabla 2. El YS, al igual que otros minerales utilizados en la agricultura puede variar marcadamente su pureza y contenido de S. Estas variaciones también se pueden presentar en fertilizantes azufrados de origen mineral como el azufre elemental (AE). La tendencia en la provisión moderna de este tipo de agro-minerales se orienta hacia fuentes de AE más concentradas en S. En el ámbito agropecuario, el AE es utilizado principalmente como enmienda para corregir la alcalinidad de los suelos, aunque el uso como fertilizante azufrado también es frecuente, fundamentalmente formando parte de fertilizantes complejos.

Los aspectos relevantes de la tecnología de la fertilización azufrada en la Región Pampeana pueden resumirse en los siguientes conceptos:

- La fertilización azufrada se convirtió en una práctica frecuente en los últimos años en la mayoría de los cultivos de la Región Pampeana. La información experimental reciente indica que los fertilizantes azufrados sulfatados, presentan similar respuesta en los cultivos.
- Se observan resultados promisorios de respuesta a la fertilización con fuentes de azufre elemental reactivo (por ejemplo micronizado, “pre-tratado”, etc.) en trigo, indicando de un

modo indirecto la existencia de condiciones favorables para la oxidación de esta fuente en las condiciones agro-ecológicas del norte de la Región Pampeana.

• La evidencia de residualidad de la fertilización con P y S en dobles cultivos como trigo/soja 2°, sumado a que se hayan observado similares respuestas entre aplicar la dosis total de estos nutrientes en el trigo o en cada cultivo, permite optimizar el manejo logístico en la soja de 2°, punto clave para maximizar el rendimiento potencial del cultivo.

Conclusiones

Hasta el momento no existe un método de diagnostico preciso para ser utilizado al momento de decidir una fertilización con S.

Un nivel de 10 ppm de $S\text{-}SO_4^{2-}$ (0-20 cm) nos permitiría separar situaciones con baja y alta probabilidad de respuesta.

En sitio con bajos contenidos de MO, o con índices de MO/limo+arcilla menores de 5, serían sitios con mayor probabilidad de respuesta.

Bibliografía

• Ciampitti I. A. y F. O. García. 2007. Requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. I Cereales, Oleaginosos e Industriales. Informaciones Agronómicas Nº 33, Archivo Agronómico Nº 11. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. Available in http://www.ipni.net/lasc.

• Echeverría H. E. 2005. Azufre. En: Fertilidad de suelos y Fertilización de cultivos. H. Echeverría y F. García, Editores. Ediciones INTA. 525 p.

• García F. O., M. Boxler, J. Minteguiaga, R. Pozzi, L. Firpo, G. Deza Marín y A. Berardo. 2006. La red de nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Resultados y conclusiones de los primeros seis años 2000-2005.AACREA. Primera edición.

• Gutiérrez Boem F. H. 2006. Azufre. In: Materia Orgánica. Valor agronómico y dinámica en suelos pampeados. R. Álvarez (coordinador). Editorial Facultad de Agronomía 206 p.

• Torres Duggan M. J. 2011. Fuentes azufradas en cultivos de grano de la región pampeana. Tesis presentada para optar al título de Magíster de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias del Suelo.

• Torres Duggan M. J., M. B. Rodríguez, R. Lavado y R. Melgar. 2010. Tecnología de la fertilización azufrada en la Región Pampeana, Estado actual y tendencias. IPNI, Revista de Informaciones Agronómicas. Nº 48 pp 19-25.

Alfredo Bono y Nicolás Romano

Métodos de diagnóstico de fertilización

Objetivos de la fertilización

Es una práctica que da mayores rendimientos por unidad de superficie. En cultivos de cosecha incrementa el rendimiento y el porcentaje de proteína en grano con una mayor eficiencia en el uso del agua. En pasturas incrementa la producción de materia seca y proteína en planta, prolonga la vida de las leguminosas (fertilizando con P), aumenta la densidad de plantas en implantación y la velocidad de rebrote, mejora la nodulación (empleando P, azufre y micronutrientes).

Cuando se piensa en la fertilización necesitamos responder varias preguntas, y tener un plan o estrategia de fertilización según indica el siguiente esquema (F. García comunicación personal).

Investigación en fertilidad de suelos

En cada región se deben seguir los siguientes pasos.

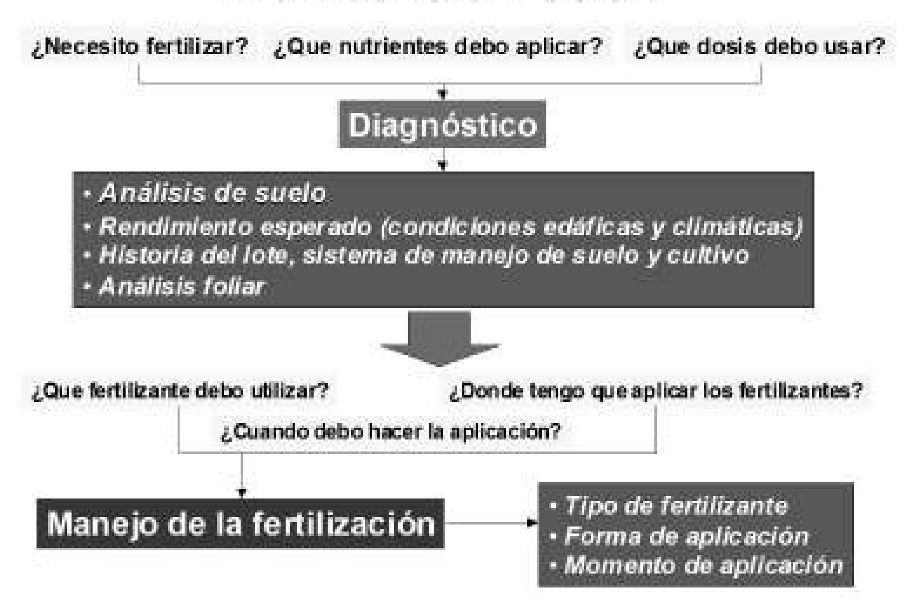
a) Exploración de deficiencias nutritivas.
b) Dosis y combinación de fertilizantes.
c) Comparación y tipos de fertilizantes.
d) Determinación de formas de aplicación.
e) Red de ensayos a campo.

Métodos de diagnóstico

Al fertilizar se busca el máximo rendimiento con la menor cantidad de fertilizante (uso eficiente del insumo). Es necesario lograr una predicción de la respuesta con un cierto grado de confiabilidad. Se busca relacionar el rendimiento y la respuesta a la fertilización con:

Análisis químicos:

- Características edáficas: nitrógeno (N) orgánico, N de nitratos (NO_3), materia orgánica (MO) total y joven, P asimilable, etc.
- Planta: N total, N de NO_3 y N de aminio (NH_4), etc.



Características climáticas: Lluvias y contenido de humedad en el suelo durante el ciclo del cultivo.
Técnicas de manejo del cultivo: Cultivo antecesor, años de agricultura, cultivares, longitud del barbecho, tipos de labranzas.

Los métodos de diagnóstico para la fertilización no son homogéneos en todas las regiones, debido a diferencias climáticas, tipos de suelo y su uso, materiales genéticos utilizados, tecnología del cultivo empleada, etc. Los métodos pueden ser simples recomendaciones o modelos matemáticos que indiquen dosis y nivel de respuesta con distinto grado de precisión. Pueden ser simples y tener una o dos variables independientes (por ejemplo, humedad del suelo, N de NO3 al finalizar el macollaje en trigo).

Con los datos obtenidos de las redes de ensayos de fertilización en trigo desde fines de los 70 y parte de los 80 se ajusto un método de diagnóstico o simple recomendación de fertilización nitrogenada (Fagioli et al. 1982). El mismo estaba basado en una sola variable, N de NO3 del suelo en primavera (Figura 1) o dos variables, humedad y N de NO3 en primavera (Ecuación 1).

Ecuación 1

$\triangle y = 70{,}4 + 1.4\, X_1 - 6.2\, X_2 \quad R^2 = 0.32$
$\triangle y$: incremento de rendimiento por agregado de 50 kg ha^{-1}

X_1 humedad hasta los 105 cm de profundidad en primavera (macollaje)
X_2 N de nitratos hasta 105 cm de profundidad en primavera (macollaje)

A medida que incrementamos el número de variables, aumentamos la calidad y precisión del diagnóstico y la complejidad del modelo. Hay modelos predictivos de la respuesta a la fertilización y modelos explicativos del rendimiento. Por ejemplo para girasol, se probaron cuatro familias de modelos incluyendo en todas las variables edáficas (N orgánico, MO, P, N de NO3 a la siembra y en 4-6 pares de hojas en la capa superficial, 0-20 cm) y:
La humedad del suelo: a la siembra (H1), 4-8 hojas (H2). Modelo 1.
El agua disponible en los dos momentos, AD1 y AD2. Modelo 2.
Lluvias durante todo el ciclo. Modelo 3.
Uso consuntivo. Modelo 4.

Las variables incluidas en los modelos (seleccionadas) 3 y 4, son explicativos en el caso de los rendimientos e incrementos de rendimiento por agregado de fertilizante, porque incluyen las lluvias durante el ciclo y el UC. Mientras las variables incluidas en los modelos (seleccionadas) 1 y 2, son predictivos, pues incluyen variables (H1 y H2 y AD1 y AD2) con las cuales se esta a tiempo para tomar una decisión en la fertilización. Los incrementos de rendimiento pueden explicarse por distintas variables pero en general están asociadas a una o dos variables edáficas y una o dos variables relacionadas con la humedad del suelo o el agua disponible.

Casi todos los métodos existentes fueron elaborados como sistemas de LC, siendo más escasa la información en SD. Los cultivos bajo este sistema de labranza requieren generalmente mayores dosis de fertilización nitrogenada que bajo LC por tener niveles de N disponible menores a la siembra de los cultivos.

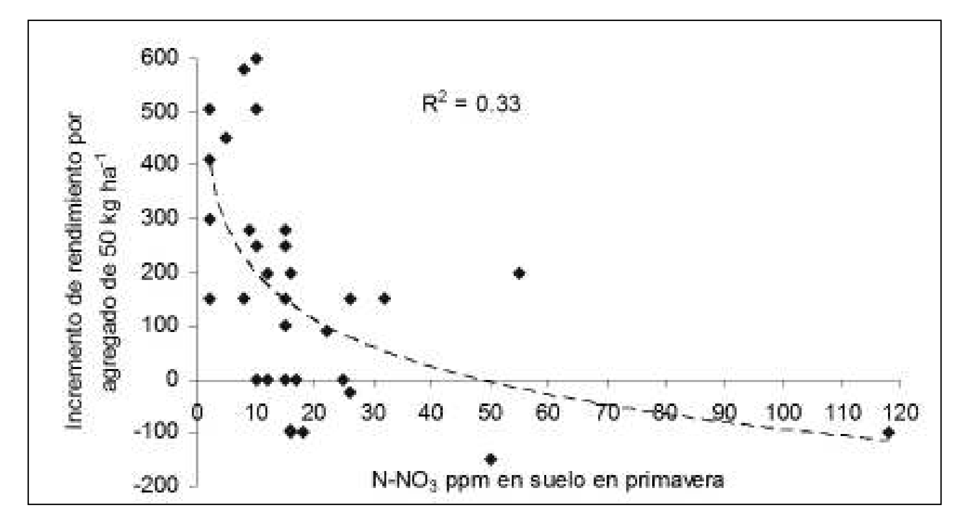


Figura 1. Respuesta a la fertilización (rendimiento del fertilizado-rendimiento del testigo) en función de la disponibilidad de un nutriente en el suelo, para una dosis fija de fertilizante (50 kg ha^{-1}).

MÉTODO DEL BALANCE

El modelo de balance se puede usar para nutrientes móviles y se aplica básicamente para diagnosticar necesidad de fertilización nitrogenada. La metodología comúnmente usada en esos estudios para abordar el problema de cuantificar la mineralización de N desde la MO humificada ha sido el balance de masas. Es una ecuación algebraica de sumas y restas donde por un lado se consideran los requerimientos del nutriente por parte del cultivo y por otro la oferta del suelo. La diferencia entre esos dos términos indica la dosis a aplicar. Puede plantearse el modelo del balance de masas de N como (Alvarez 1999):

N cultivo + N residual = N siembra +
N fertilizante + N descomposición +
N mineralización – N pérdidas

Donde:
N cultivo = N absorbido por el cultivo en madurez o N requerido por el cultivo como objetivo de rendimiento (Tabla 1).
N residual = N-NO-3 a la cosecha del cultivo, comúnmente en el estrato 0-60 cm, se estima 25 % del inicial.
N siembra = N-NO-3 a la siembra, comúnmente en el estrato 0-60 cm.
N descomposición = N liberado o inmovilizado por los residuos del cultivo antecesor en descomposición durante el ciclo del cultivo de interés.
N mineralización = N mineralizado desde la MO humificada. Está en relación con la cantidad y calidad de la MO, la temperatura, la textura y el período de crecimiento del cultivo.
N perdidas = N perdido del agrosistema por volatilización, desnitrificación y lixiviación. No hay mucha información y se consideran del 10 % cuando se aplican fertilizantes en la superficie del suelo en SD.

Como la evaluación de todas las pérdidas es metodológicamente muy dificultosa, muchas veces se simplifica el balance considerando en conjunto el término N mineralización - N pérdidas. Al mismo se lo denomina mineralización aparente y representa el aporte de N desde la MO humificada al cultivo menos las pérdidas gaseosas y por lixiviación. Determinando experimentalmente N cultivo, N residual, N siembra, N descomposición y fijando N fertilizante en un experimento es posible estimar la mineralización aparente de N y establecer un coeficiente de mineralización de la MO del suelo útil en el diseño de estrategias de fertilización.

En el campo experimental de la EEA Anguil-INTA en 1997 se instaló un macro ensayo en un suelo Haplustol Entico, con un horizonte A de 18 cm y una capa de tosca a profundidad variable entre 80 y 120 cm, textura franca con 1,93 % de MO, 0,10 % de N orgánico y 32,6 mg/kg de fósforo asimilable . El objetivo fue determinar los coeficientes de mineralización de N para cultivos de trigo y maíz en un suelo representativo de la RSP en un experimento de larga duración con una rotación común para la región. Con la información generada en este trabajo se puede replantear el modelo de balance para estimar la dosis de N a aplicar (Bono y Alvarez 2007a):

N fertilizante = (N cultivo + N residual)
– (N siembra + N descomposición
+ N mineralización aparente)

Donde:
N cultivo: se calcula con un rendimiento estimado para el sitio de producción y un coeficiente b que indica la cantidad de N que tiene que absorber un cultivo para producir una tonelada de grano. Se estima habitualmente en 30 kg N t grano para trigo^{-1} y 20 – 22 kg N t grano para maíz^{-1} (Alvarez 2005a, b, Ciampitti y García 2007).
N residual: N-NO-3 a la cosecha del cultivo, comúnmente en el estrato 0-60 cm, se estima 25 % del inicial.
N siembra: se determina por análisis de N- NO-3 en el estrato 0-60 cm del suelo. En la RSP puede estimarse 0-60 cm determinado N- NO-3 a 0-20 cm, es en promedio 2.4 veces mayor de 0-60 cm que el del estrato 0-20 cm. (VER EN NITRATOS, Figura 2, CAPITULO XIV (Bono y Alvarez 2007b).
N descomposición: casi no hay información sobre este componente de la ecuación de balance. Con los resultados de este experimento puede generalizarse como un promedio unos 10 kg N ha^{-1} entregados para cultivos de maíz y trigo.
N mineralizado: habría que determinar N orgánico cada 25 cm hasta el metro y aplicar a cada estrato el coeficiente de mineralización que le corresponde. Se puede estimar en forma aproximada determinando N orgánico en el estrato 0-50 cm y considerar que el N mineralizado en esa capa representa el 76 % del total que se producirá en el suelo.

Tabla 1. Cantidad de nutriente total absorbido y extraído en grano expresado en kg de nutriente por tonelada de grano en base seca. Ciampitti y García 2007.

	Absorción total kg^{-1}t				Extracción de grano kg^{-1}t			
Cultivo	N	P	K	S	N	P	K	S
Trigo	30	5	19	5	21	4	4	2
Maíz	22	4	19	4	15	3	4	1
Girasol	40	11	29	5	24	7	6	2
Soja	75	7	39	4	55	6	19	3

El N orgánico se mineraliza más intensamente en la superficie del suelo y tiene una magnitud similar a la de los suelos de la porción húmeda de la Región Pampeana pero se distribuye de diferente manera en profundidad. En la Pampa Ondulada, sobre la base de perfiles de mineralización de la MO se estableció que un 83 % del total de carbono mineralizado proviene de la MO de los primeros 30 cm del suelo (Alvarez 1999). En cambio, en la RSP, las capas profundas mineralizan proporcionalmente más N que en suelos con Horizonte B fuertemente textural. Esto puede deberse a la baja cantidad de arcilla en las capas subsuperficiales del Haplustol Entico donde se realizó el presente experimento. En el mismo no había cambios de la textura con la profundidad, siendo el contenido de arcilla más limo de alrededor de 45 % en todo el perfil.

Para maíz:

N mineralizado= N orgánico 0-25 * 2.56
+ N orgánico 25-50 * 1.50
+ N orgánico 50-100 * 1.18

Para trigo:

N mineralizado= N orgánico 0-25 * 0.87
+ N orgánico 25-50 * 0.51
+ N orgánico 50-100 * 0.40

Esta metodología de cálculo del requerimiento de N fertilizante asume que el N es el único limitante del rendimiento y no admite una evaluación económica. Es útil cuando no se dispone de métodos más precisos como curvas de rendimiento ajustadas a las condiciones de producción de una región. Como los coeficientes propuestos se han estimado sobre la base de un solo experimento es necesaria más información para generalizar estos resultados.

Para este método del balance es necesario poseer estimaciones locales de varios de los componentes de la ecuación. En especial, es difícil predecir el rendimiento esperado. Este no sólo será el resultado de la disponibilidad de N sino también de otros nutrientes, del agua disponible, del manejo y de las condiciones sanitarias y de enmalezamiento. Dicha estimación se realiza generalmente sobre la base de los rendimientos obtenidos con anterioridad en el lote o probables en el área considerada.

Fertilización en trigo

El cultivo de trigo es el que presenta mayor información en fertilización nitrogenada, fosfática y combinada N+P. Luego del primer método simple de diagnóstico o recomendación generado a mediados de los 80 (Fagioli et al. 1982) se trabajo con la información generada en la red de ensayos de fertilización en el cultivo en la Región Semiárida y Subhúmeda Pampeana (RSSP) desde 1996 hasta el 2004. Se usaron dos sistemas de labranza, LC de la zona (rastras y discos) y en siembra directa (SD) en los distintos ensayos. Los mismos fueron instalados en distintos tipos, profundidades y textura de suelo. La humedad del suelo a la siembra del cultivo explica el 30 % (Figura 2). Pero fue posible generar un modelo capaz de explicar el 48 % de la variabilidad del rendimiento de trigo (Figura 3):

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}) = -2400 + 10\ HS - 0.011\ HS2 + 36000\ NO - 139000\ NO\ 2 + 9\ NSF - 0.02\ NSF2 + 520\ P + 290\ T - 690\ SL$$

Donde:
NO: nitrógeno orgánico, HS: humedad a la siembra (mm), NSF: nitrógeno de nitratos 0-60 cm más nitrógeno del fertilizante (kg ha^{-1}), P: profundad del suelo (0 menor a 60 cm y 1 mayor a 60 cm), T: textura (0 más de 70 % de arena, 1 menos de 70 % de arena), SL: sistema de labranza (0 SD y 1 LC) (Bono y Alvarez 2006).

Para la construcción del modelo se sumaron las fuentes de N suelo y fertilizante por tener ambas efi-

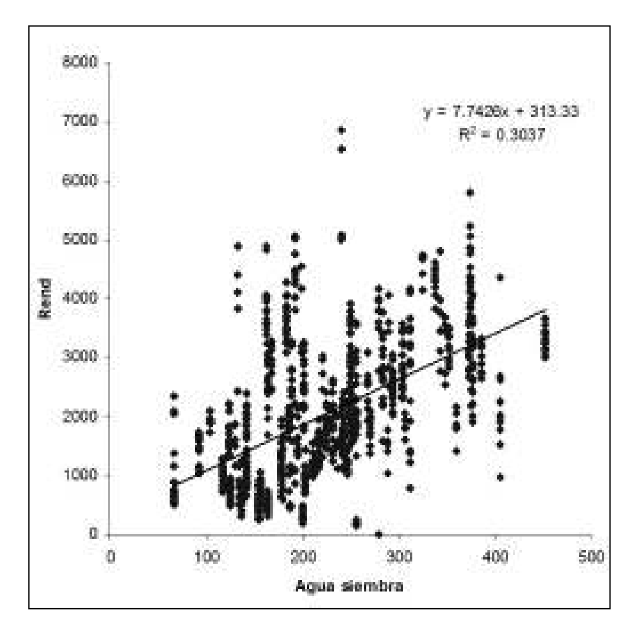


Figura 2. Rendimiento del cultivo en relación al contenido de humedad total a la siembra.

ciencias medias muy parecidas (aprox. 7 kg grano kg^{-1} N). La humedad a la siembra y las variables relacionadas con una mayor captación o almacenaje de agua en el perfil como la textura, la profundidad y el sistema de labranza tienen una fuerte incidencia en el rendimiento. Estos datos confirman trabajos previos en la región (Bono et al. 1997; Bono y Quiroga 2003). También fueron incluidas variables relacionadas con la disponibilidad de nitrógeno. El nivel de P asimilable del suelo y la dosis de fertilización fosforada no tuvieron efectos significativos sobre el rendimiento. En la Figura 4 se observan distintos escenarios con N orgánico (alto, 0.15 % y bajo, 0.03%) y contenido de humedad a la siembra (alto, 470 mm y bajo, 70 mm).

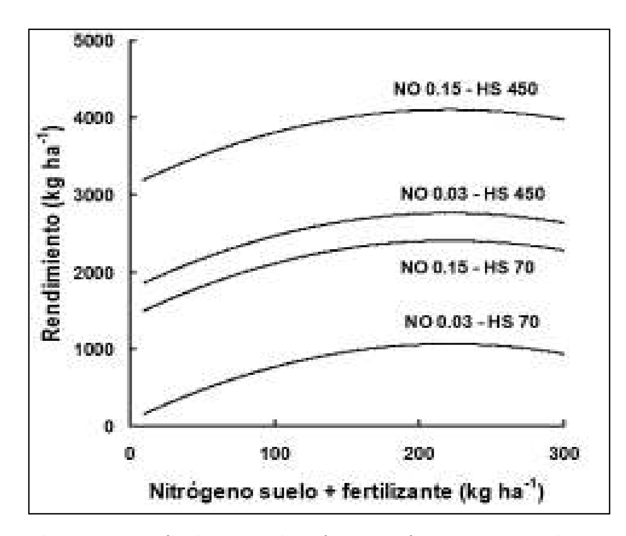


Figura 4. Rendimiento estimado para algunos escenarios posibles con niveles de altos y bajos de nitrógeno orgánico (NO) y humedad a la siembra (HS) (Bono y Alvarez 2006).

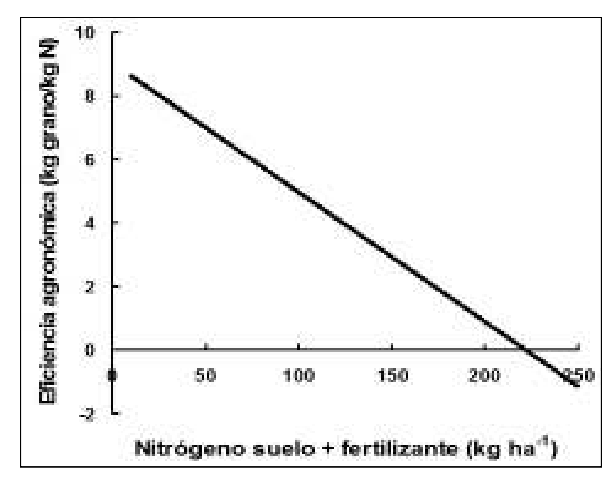


Figura 5. Eficiencia agronómica del nitrógeno suelo más el fertilizante estimada con un modelo de regresión múltiple para la Región Semiárida y Subhúmeda Pampeanas (Bono y Alvarez 2006).

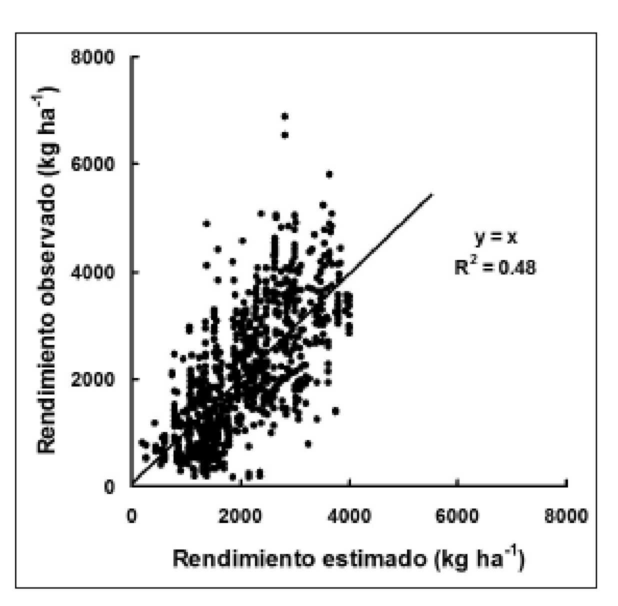


Figura 3. Relación entre el rendimiento observado y el estimado por el modelo desarrollado.

Tabla 2. Dosis de N a aplicar a cultivos de trigo en la RSSP en función de la relación de precios fertilizante/grano y el nivel de N de NO-3 del suelo hasta 60 cm de profundidad (precio del fertilizante: precio del kg de N puesto en el campo, precio del grano: precio neto del kg de grano luego de descontar los costos de cosecha, flete y comercialización). Dosis calculadas sin considerar un costo de aplicación del N, asumiendo que el fertilizante puede aplicarse con la sembradora al implantar el cultivo. Cuando es necesaria una labor adicional para la fertilización, para un costo de aplicación de 5 U$S ha^{-1}, no se deben aplicar dosis menores a 40 kg N ha^{-1} para que se compense el costo de la fertilización y la práctica sea rentable.

Nitrógeno de nitratos (kg ha^{-1})	Relación de precios					
	4	5	6	7	8	9
	Dosis (kg de N ha^{-1})					
20	103	79	54	31	5	0
30	93	69	44	21	0	0
40	83	59	34	11	0	0
50	73	49	24	1	0	0
60	63	39	14	0	0	0
70	53	29	0	0	0	0
80	43	19	0	0	0	0
90	33	9	0	0	0	0
100	23	0	0	0	0	0
110	13	0	0	0	0	0
120	3	0	0	0	0	0
130	0	0	0	0	0	0

La dosis de N económicamente óptima depende de la relación de precios fertilizante/grano. La eficiencia agronómica de la red experimental, estimada usando el modelo desarrollado, fue baja. Cuando la relación de precios es alta (7-8 o más) no conviene fertilizar en la región (Figura 5, Tabla 2). Para relaciones de precios menores la fertilización nitrogenada puede ser rentable, según el nivel de nitrógeno de nitratos del suelo.

Aunque hay años y/o lotes que favorecen las aplicaciones de fertilizante a la siembra y otros al macollaje o en ambos momentos, la respuesta productiva, en promedio suele ser similar. El momento de aplicación de N no fue una variable con efecto significativo sobre el rendimiento de trigo. Tampoco impactó significativamente sobre la respuesta a la fertilización (Figura 6A). Las respuestas promedio de la red fueron similares a la siembra o el macollaje. El análisis de situaciones donde se produjeran variaciones importantes de la humedad del suelo entre esos momentos del ciclo tampoco mostró efectos del momento de la fertilización sobre la respuesta (Figura 6B). Tanto en casos donde la humedad a la siembra era baja y aumentaba al macollaje, como en situaciones donde inicialmente se disponía de alta humedad y el suelo se secaba posteriormente, no se evidenció ninguna tendencia de las diferencias en la respuesta del cultivo al momento de fertilización. Esto concuerda con el análisis de datos de otras subregiones de la Región Pampeana que ha mostrado también la falta generalizada de efecto del momento de fertilización sobre la respuesta de trigo a N y puede atribuirse estos resultados a las escasas pérdidas de N que se producen en las etapas iniciales del ciclo del cultivo (Alvarez y Steinbach 2006).

La dosis de N a aplicar debe determinarse sobre la base de la relación de precios fertilízate/grano y el contenido de N de NO-3 del suelo en los primeros 60 cm del perfil. Es posible estimar este último valor con exactitud disponiendo del dato del contenido de N de NO-3 en la capa 0-20 cm del suelo, (Capítulo XIV Nitratos Figura 2) (Bono y Alvarez 2007b). El momento de aplicación depende de consideraciones de tipo empresarial. En aplicaciones a la siembra se asegura la ejecución de la fertilización en etapas tempranas del cultivo y si por motivos diversos no pudiera realizarse en ese momento queda la opción de aplicar el N durante el macollaje. Por el contrario, si se decide la aplicación tardía, es posible inspeccionar el estado del cultivo previo a la aplicación de N y regular esta en función del mismo. Esta ventaja se contrapone al problema que por motivos climáticos o de otra índole pudiera no ser posible la fertilización en ese momento. En este caso se perdería la oportunidad de realizar la práctica. La decisión del momento de la fertilización debe tomarse en función de estas consideraciones.

Fertilización en maíz

El maíz junto al girasol y la soja son los cultivos de cosecha gruesa que están incorporados a los sistemas mixtos dominantes de la RSP. El área sembrada de maíz en la Provincia de La Pampa es de 450.000

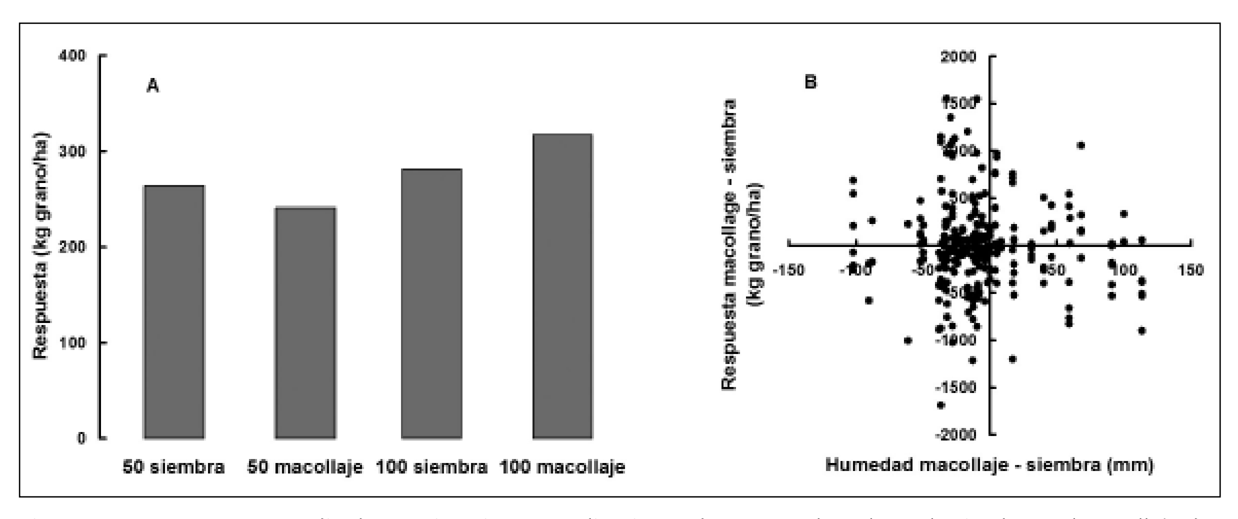


Figura 6. A: respuesta promedio de 126 situaciones a aplicaciones de 50 o 100 kg N ha^{-1} a la siembra o el macollaje de trigo, B: relación entre el cambio en la humedad del perfil del suelo entre macollaje y siembra y la variación del rendimiento de trigo fertilizado en esos momentos.

ha de las cuales se destinan 150.000 ha a cosecha de grano (Lorda et al. 2003; Anuario 2009). El uso de fertilizantes en maíz es preponderantemente en siembra directa, siendo el fosfato diamónico y la urea los más usados (Lorda et al. 2003). En la región se observa, en general, una gran variabilidad en rendimiento con un rango de 2000 a 10000 kg ha^{-1} con un promedio de 5.000 kg ha^{-1} en cultivos sin fertilizar. Los niveles de fertilidad y el manejo del agua del suelo son las principales causas de estas variaciones (Quiroga et al. 1997). En función de las demandas nutricionales para obtener rendimientos máximos y de la oferta edáfica de la región, en la mayoría de los casos el maíz no cubre sus requerimientos de N. En el caso del P depende de la oferta edáfica de cada sitio o región.

En los últimos 20 años se han realizado numerosos experimentos de fertilización principalmente con N y P en toda la Región Húmeda Pampeana y con asufre en la Zona Núcleo Maicera (Álvarez 2007a). La fertilización nitrogenada en maíz suele realizarse a la siembra, al estado de 6-8 hojas o en algunos casos dividiendo la dosis entre estos dos momentos. Ensayos realizados en Pergamino y Rafaela mostraron que no hay diferencias entre las fertilizaciones a la siembra y fraccionadas, mientras las fertilizaciones postergadas a 6-8 hojas tuvieron una respuesta algo inferior. En el noroeste de Buenos Aires Barraco y Díaz-Zorita, (2006) realizaron 11 ensayos de fertilización nitrogenada sobre Hapludoles durante 3 campañas. Usando el rendimiento relativo como variable respuesta propusieron un umbral de 135 kg de N ha^{-1} de disponibilidad (suelo + fertilizante) por encima del cual la respuesta a la fertilización es casi nula. También en el Oeste Bonaerense (partidos de Rivadavia y Trenque Lauquen) Bono y Scianca, (2003) realizaron 10 ensayos de fertilización con macro y micronutrientes. El N fue el nutriente con mayor efecto sobre el rendimiento y las variables edáficas relacionadas con este nutriente explicaron un 20 % de la respuesta.

Desde el ciclo 2000/2001 al 2010/11 se realizaron 44 experimentos de fertilización en el este de la Provincia de La Pampa y oeste de la Provincia de Buenos Aires sobre Haplustoles Énticos (21 ensayos) y Hapludoles Típicos (23 ensayos) (Bono y Alvarez 2012 a). En casi todos los sitios los suelos eran profundos, (profundidad mayor a 140 cm). Solo un experimento se realizó en un suelo de 100 cm de profundidad. El sistema de labranza fue el convencional de la zona (rastras y discos) en seis casos y en 38 siembra directa. En los ensayos se siguió el manejo del cultivo adoptado por el productor. Las propiedades de los suelos se indican en la Tabla 3 Los cultivos antecesores fueron girasol (n= 11) soja (n= 16), trigo (n= 1), verdeos (n 7), pasturas (n= 4) y maíz (n= 5).

Se utilizó en todos los casos un testigo y se aplicaron distintas dosis de N, P y S (Tabla 3). Las fuentes de N utilizadas fueron: urea, urea recubierta (urea+nBTPT), sulfato de amonio, sulfonitrato de amonio, sulfato de calcio, UAN+tiosulfato de amonio, súper fosfato triple de calcio y fosfato diamónico. En el caso del N las aplicaciones se hicieron a la siembra y en V6. Durante el período experimental hubo ciclos de cultivo húmedos con muy altas precipitaciones (máximo de 630 mm) y niveles de humedad en el suelo a la siembra (máximo de 522 mm), en los que se obtuvieron altos rendimientos (máximo de 17000 kg ha^{-1}) (Tabla 3). En contraposición, ciclos muy secos (mínimo: 122 mm de agua a la siembra y 266 mm de lluvia durante el ciclo), donde el cultivo no pudo cubrir sus requerimientos hídricos y los rendimientos fueron muy bajos (mínimo de 1300 kg ha^{-1}). Si bien, numerosos trabajos en la

Tabla 3. Características de los suelo bajo estudio, humedad de suelo a la siembra (0-140 cm), lluvias durante el ciclo, dosis de nitrógeno, fósforo y azufre aplicados, rendimiento y respuesta a la fertilización..

	MO (%)	NO (%)	PE (mg kg^{-1})	L+A %	MO/(L+A)	$N\text{-}NO_3^-$ (kg ha^{-1})	Agua (kg ha^{-1})	Precipitación (mm)	N	P	S	Rendimiento (kg ha^{-1})	Respuesta (kg ha^{-1})
Promedio	1.81	0.09	20.9	30.6	6.3	68.5	233.6	441.3	57	11	5	7644	1150
Máximo	3.32	0.17	38.3	58.0	15.0	202.2	522.0	630.0	200	28	25	17108	6708
Mínimo	0.61	0.03	5.6	14.7	3.2	17.7	122.2	266.0	0	0	0	1367	-2912

MO: materia orgánica; NO: nitrógeno orgánico; PE: fósforo asimilable; Indice: relación en % entre la materia orgánica (MO) y el limo + arcilla (L+A), N-NO3-: nitrógeno de nitratos, Agua: humedad total en el suelo a la siembra; precipitación: lluvias de octubre a febrero. N: nitrógeno; P: fósforo; S: Azufre

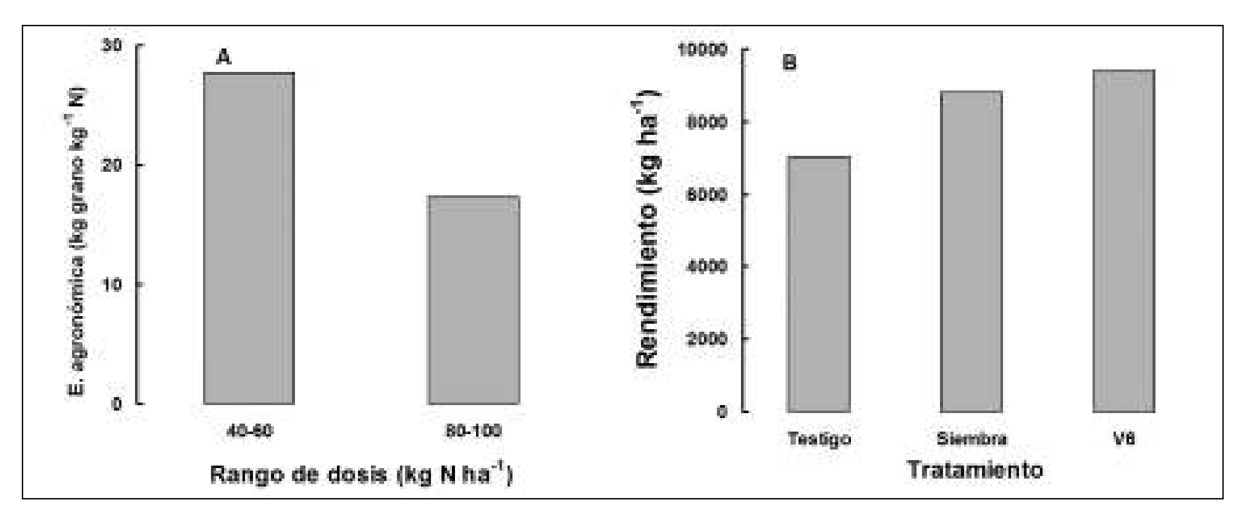


Figura 7. A) Eficiencia agronómica en función del rango de dosis de nitrógeno aplicados, n= 44 y B) rendimiento en grano en relación a los momentos de fertilización, n=9.

Región Pampeana indican que la humedad del suelo condiciona fuertemente los rendimientos y la respuesta a la fertilización del cultivo (Alvarez 2007, Alvarez et al. 2006) en esta red de experimentos la humedad del suelo a la siembra solo pudo explicar el 23 % del rendimiento.

Se detectó respuesta significativa a la fertilización nitrogenada (P=0.05). La eficiencia agronómica promedio para un rango de dosis de nitrógeno de 40 a 60 kg ha^{-1} fue alta (28 kg de grano kg^{-1} de N) (Figura 7 A). Estos valores son similares a los obtenidos en la Región Núcleo Maicera, (Melgar 1997). La relación de precios promedio de los últimos 20 años para la región fue de 10 kg de grano kg^{-1} y la actual es de 12 kg de grano kg^{-1} de N (Síntesis económica-Agro mercado 2010). No se pudo generar un modelo predictivo de la respuesta a la fertilización nitrogenada con ninguna de las variables de suelo y climáticas disponibles. No hubo efecto significativo a momentos de fertilización (Figura 7 B), ni de la fuente de N aplicada (datos no mostrados). La tecnología de fertilización ha sido revisada anteriormente por Alvarez et al. 2000; Barbagelata 2000 y Barraco y Díaz Zorita 2005 y en general se considera que para N no existe evidencia clara de diferencias en el momento de fertilización a la siembra o V4- V6. Sin embargo, estos resultados difieren con estudios realizados bajo siembra directa en el Sudeste Bonaerense (Pagani et al. 2008) y norte de Buenos Aires (Ferrari et al. 2001) donde observaron ventajas de fertilizar en V6 respecto a la siembra.

No hubo respuesta significativa a P, ni interacción significativa entre N y P (Figura 8). En estos experimentos el rango de valores de P asimilable fue de 6 a 38 mg kg^{-1}, pero predominaron los niveles por arriba de 15 mg kg^{-1}. Esto podría explicar la falta de respuesta a P. En el sur de Santa Fe Capurro et al. (2007) observaron que no hubo respuesta a P a pesar de los bajos niveles de este nutriente en el suelo, sugiriendo que el P-Bray podría no ser un buen indicador de disponibilidad.

Tampoco se detectó respuesta significativa a S en 29 experimentos realizados con este nutriente. Mientras en la Zona Núcleo Maicera se han encon-

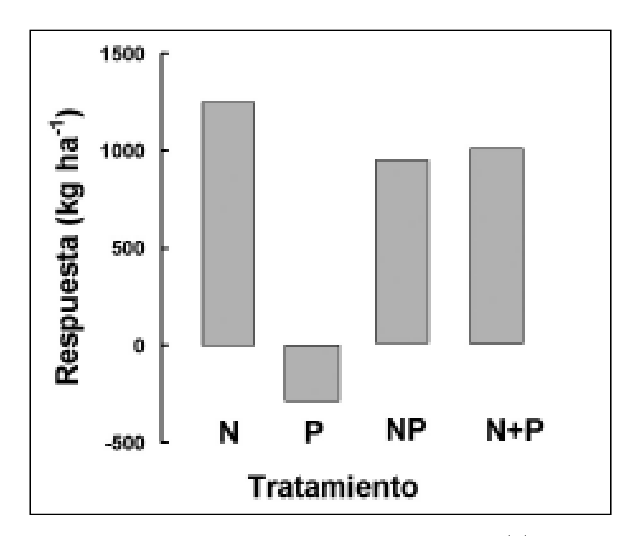


Figura 8. Respuesta al agregado de nitrógeno (N) y fósforo (P) agregados en forma independiente, combinados en un mismo tratamiento (NP) y suma de las respuestas individuales a nitrógeno y fósforo (N+P), n=21.

Tabla 4. Significancia de las respuestas a la fertilización.

Efecto	Pares de datos	Respuesta (kg grano/ha)	Significancia
Fertilización nitrogenada (N)	638	294	0,01
Fertilización fosforada (P)	176	115	0,05
Fertilización azufrada (S)	60	-71	ns
Interacción N x P	120	-	ns
Momento aplicación N	81	-	ns
Fuente N	101	-	ns

trado respuestas positivas al agregado de S, relacionándola al nivel de sulfatos del suelo (García et al. 2005), otros grupos de trabajo no encontraron esa relación (Ferraris et al. 2005). En el sur de Santa Fe Capurro et al. (2007) encontraron respuestas variables a S. Por otro lado, Prystupa et al. (2006), sobre la base de 18 experimentos, propusieron un modelo que explica el 46 % de la respuesta de maíz al agregado de S. Si bien los suelos de la RSSP tienen en general niveles bajos de materia orgánica, la red no mostró respuestas a este nutriente.

Fertilizacion en girasol

La variación de los rendimientos entre lotes y entre años es muy amplia, y depende de factores ambientales, edáficos y de manejo del cultivo. La elección del híbrido es otro aspecto a tener en cuenta, dado el notorio avance genético en los nuevos materiales, en especial en cuanto a resistencia a enfermedades, producción de aceite y resistencia a la sequía.

En un trabajo realizado entre 1997 y 2007 (Bono y Alvarez 2007c) encontraron respuesta significativa del rendimiento a la fertilización nitrogenada y fosforada, pero no a la azufrada. Tampoco se detectó interacción entre N y P. No hubo efectos del momento de aplicación del N ni la fuente agregada sobe la magnitud de la respuesta del cultivo (Tabla 4). Los modelos de regresión logrados para explicar el rendimiento y la respuesta a la fertilización tuvieron bajo ajuste y no fueron útiles para predecir el comportamiento del girasol ante el agregado de fertilizantes (resultados no presentados). En promedio se observó una respuesta de unos 300 kg grano ha^{-1} a la aplicación de N y de alrededor de 100 kg grano ha^{-1} a la aplicación de P.

Variables de sitio comunmente usadas para predecir la respuesta de los cultivos a la fertilización no permitieron estimar las respuestas del girasol. Sin embargo, en trabajos previos la humedad del suelo juego un rol muy importante en la producción del cultivo en la región bajo estudio (Bono 2005; Bono et al. 1997; Bono et al. 2005) (Figura 9). La respuesta a nitrógeno no dependió del nivel de nitratos del suelo y el nivel de P asimilable no estuvo relacionado a la respuesta a P. Los niveles de P asimilable en esta red de ensayos fueron medios a altos, la mayoría superiores a 10 ppm (Figura 10).

En consecuencia, no fue posible generar ecuaciones predictivas que permitan estimar cómo va a responder el rendimiento del girasol al agregado de nutrientes según la fertilidad del sitio y solo es posible presentar valores medios de respuesta y eficiencia. Para N la eficiencia de respuesta disminuyó al aumentar la dosis, pasando de aprox. 6.5 a 4.5 kg grano kg N^{-1} cuando la dosis se incrementaba de 40 a 80 kg N ha^{-1} (Figura 11).

Estimando un precio promedio histórico de girasol de 230 U$S/t, gastos de cosecha, flete y comercialización del 20 % y un precio medio de la urea de 300 U$S/t, puede estimarse una relación de precios promedio de aprox. 4. Esto implica que es necesario producir al

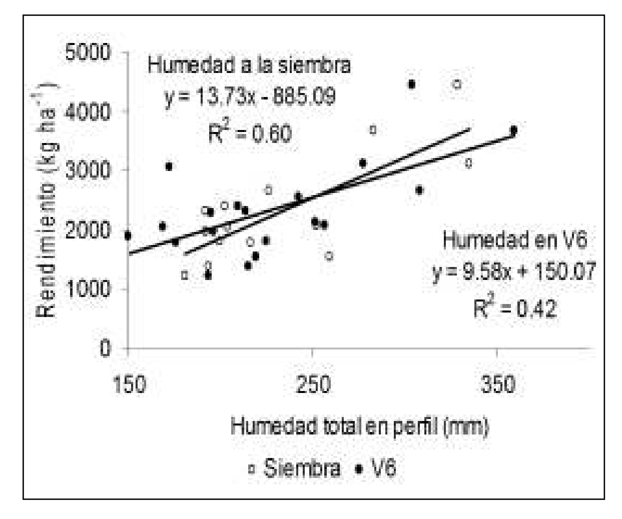


Figura 9. Rendimiento en grano en función de la humedad de suelo a la siembra y la humedad en el estadio 4-6 pares de hojas del cultivo de girasol.

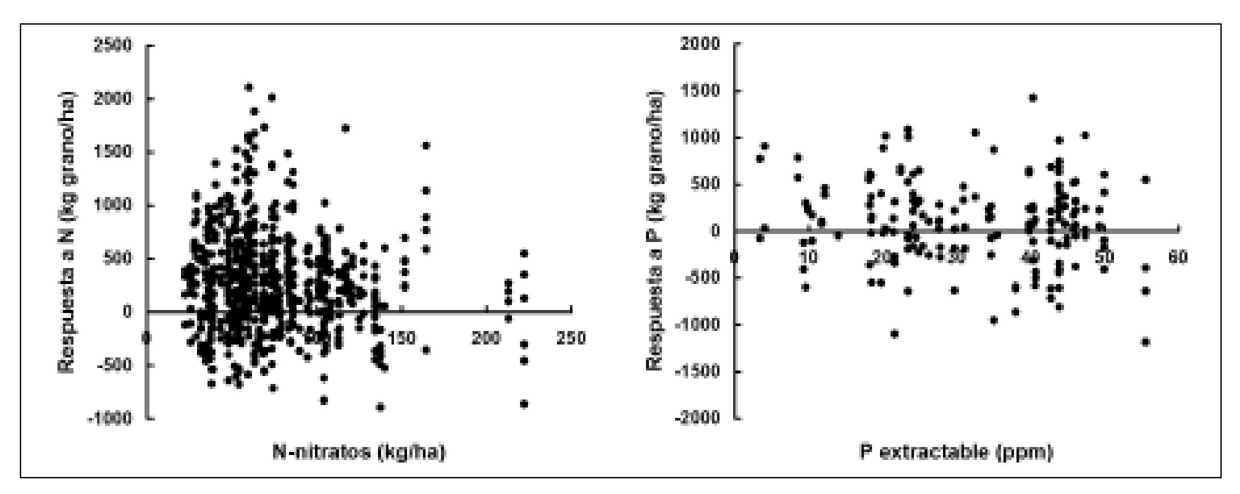


Figura 10. Relación entre la respuesta a N y a P con los contenidos de N de nitratos y fósforo extractable de los suelos.

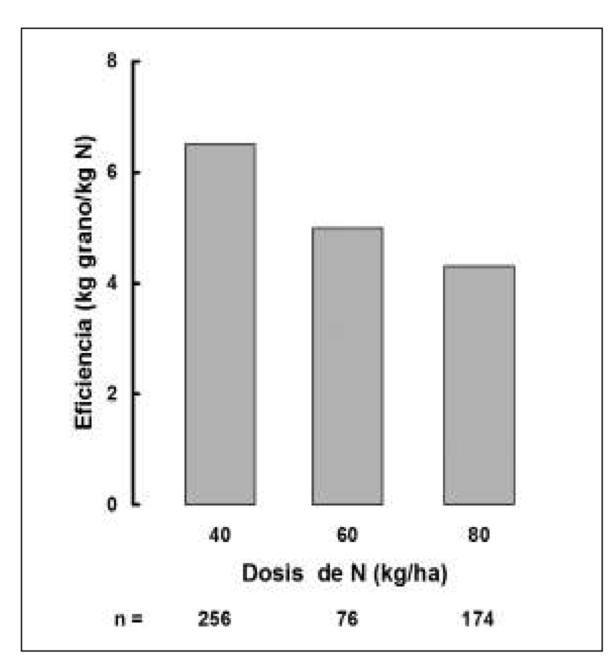


Figura 11. Eficiencia de respuesta de girasol a la fertilización con distintas dosis de nitrógeno. Los números bajo las barras (n) representan la cantidad de observaciones promediadas en cada caso.

menos unos 4 kg grano kg N^{-1} agregado para pagar el fertilizante. Dosis bajas, de 40 kg N ha^{-1} o similares, resultan entonces generalmente económicas, mientras que dosis altas dejan de serlo. Para P la eficiencia de respuesta media de la red experimental fue de 6 kg grano kg P^{-1} aplicado, para dosis de 20 kg P ha^{-1}. Considerando un precio medio del fosfato diamónico de 380 U$S/t la relación de precios de indiferencia es de aprox 11. Esto indica que no es rentable económicamente la fertilización del girasol con este nutriente en la región de estudio.

Boro en girasol

La fertilización con micronutrientes en girasol no es una práctica realizada frecuentemente en la región girasolera Argentina. A pesar de que numerosos análisis de suelo indican que el Boro (B) sería uno de los micronutrientes con probables respuestas económicas a la fertilización, las respuestas a la aplicación de este nutriente son un tanto aleatorias (Montoya et al. 2003). El B debe considerarse un factor dinámico para las plantas. Su disponibilidad está condicionada por variables de suelo, tales como humedad, pH, contenido de MO, textura, relación con otros nutrientes; y por variables que dependen de las plantas. Los rangos de concentración de suficiencia y toxicidad son muy estrechos, y variables entre especies. Durante seis campañas se realizaron 20 ensayos en el este de La Pampa y oeste de Buenos Aires para medir las respuestas al agregado de B. Se compararon un testigo absoluto contra un tratamiento con aplicación de N, P, S solo y otro tratamiento con B. Las aplicaciones con B se realizaron con distintas fuentes foliares con dosis de 1.5 y 3 lt ha^{-1}. Se usaron dos momentos de aplicación en V6 y R1. En las aplicaciones de NPS se usaron dosis 50, 20 y 30 kg ha^{-1} respectivamente. Dentro de los 20 ensayos, hubo casos donde se aplico B solo en V6, en otros R1 y en otros tratamientos en V6 y R1 (Tabla 5). En esta red de ensayos el contenido de B en suelo (0-20 cm) y en planta tuvo un rango de valores medios a altos de 0.3 a 2.2 mg kg^{-1} (suelo) y 36.8 a 152 mg kg^{-1} en planta (botón floral). Sin bien, los niveles de B en suelo han disminuido con el avance de la agricultura, el norte de la región pampeana es la que presenta los valores menores al umbral de suficiencia (0 a 0.9 mg kg^{-1}) (Sainz Rozas et al. 2012).

Tabla 5. Momentos de aplicación, años, lugares y cantidad de ensayos con fertilización foliar con B en girasol.

Momentos de aplicación de B	Años					
	2004/05	2005/06	2006/07	2009/10	2010/11	2011/12
V6 R1 V6 y R1	0 1 0	0 0 1	0 0 3	0 0 3	4 5 0	0 0 3
Lugares de ensayos	Anguil (1)	Anguil (1)	Parera (1) MariLauquen (1) C. Suárez (1)	Alvear (1) Agustoni (2)	Alvear (5) Agustoni (4)	Anguil (1) Uriburu (2)

Las condiciones climáticas no fueron muy favorables, en algunos casos con rendimientos de 1100 a 1900 kg ha^{-1} y en otras muy favorables, con rendimientos promedios de 3100 a 3400 kg ha^{-1}. En general no se observaron respuestas significativas al agregado de B. Tampoco se observaron diferencias significativas en el momento de aplicación de B (Bono y Romano 2011). Sin embargo, en muchas situaciones, se obtuvieron incrementos de rendimiento en grano y materia grasa del fertilizado con B en los distintos momentos de aplicación, con relación del fertilizado con NPS solo y el testigo absoluto. Los incrementos de rendimiento variaron de 30 a 250 kg ha^{-1} (6 % en promedio) con respecto al tratamiento con NPS y de 100 a 700 kg ha-1 (7 a 32 %) con relación al testigo absoluto.

Fertilización en soja

La expansión del cultivo de soja y la importancia que este ha adquirido en la RSP, ha generado la necesidad de contar con información zonal acerca del cultivo. Si bien se están llevando a cabo ensayos en este cultivo, muchos de estos presentan un enfoque diferente en cuanto a temáticas sobre respuesta a la fertilización.

La soja está menos comprometida, por el aporte adicional debido a la fijación biológica de N (FBN) que realiza el cultivo. Hay que tener en cuenta en primer lugar que estamos hablando de una leguminosa, por lo tanto, parte de sus requerimientos de N deben o deberían ser cubiertos mediante la fijación FBN. La misma aporta entre el 25% y el 85% del total de N absorbido por el cultivo, (González et al. 1997; Racca 2002). Debido al importante rol que cumple la FBN, es necesario lograr una alta eficiencia de este proceso. Para esto la inoculación de las semillas de soja es imprescindible.

Se estima que para una producción de 1000 kg de grano por hectárea se necesitan aproximadamente 65 kg de N. A esto hay que agregarles 15 kg para la producción de hojas, tallos y raíces, totalizando 80 kg de N. Por lo tanto en una producción de soja de 3000 kg de grano por ha se necesitarían 240 kg de N por ha (Hungría et al. 2001).

Esta cantidad de N requerida por el cultivo es cubierta por la FBN, la mineralización de la MO y el aporte de fertilizantes. En condiciones normales de crecimiento del cultivo, presentando una buena nodulación, no es

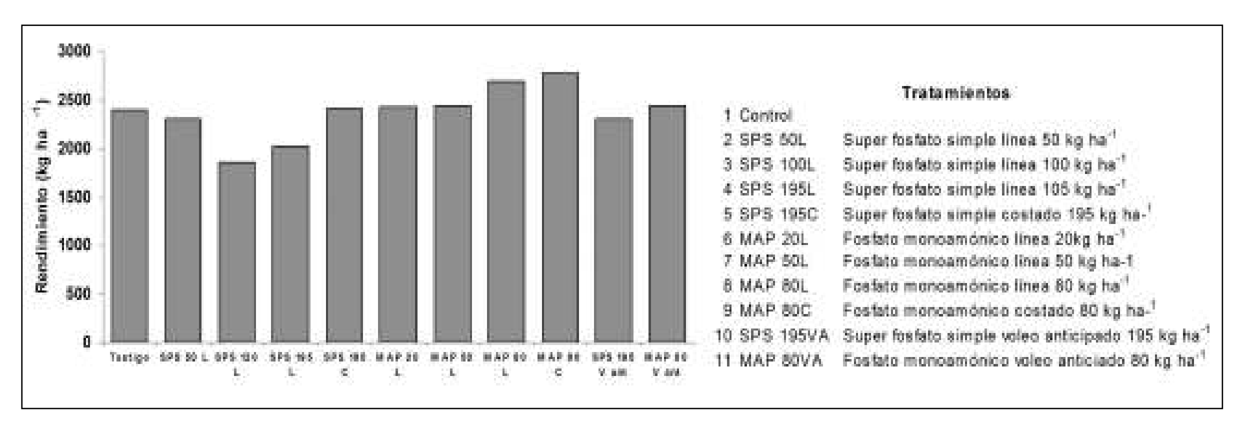


Figura 12. Rendimientos observados en el cultivo de soja en la campaña 2006/2007 en la localidad de Agustoni, La Pampa.

de esperarse respuestas al agregado de N. En la medida que el proceso de FBN sea afectado, los otros ingresos de N adquirirán mayor importancia. En la Figura 12 se observa un ensayo de fertilización con distintas fuentes de fertilizantes fosforados aplicados en diferentes formas el cual fue realizado en la localidad de Agustoni, provincia de La Pampa. En este sitio se manifestó una pobre nodulación esto provocó que las fuentes que incluían N (MAP) generaran la mayor respuesta a la fertilización (Datos no publicados).

En el caso del P, el proyecto fertilizar (INTA) realizó una red de ensayos de fertilización en soja de primera en la región pampeana durante dos años 2000/01 y 2001/02 (Echeverría et al. 2002). Se ajustó una función donde se graficó el rendimiento del cultivo no fertilizado de 32 sitios en función del contenido de P asimilable en la capa de 0-20 cm de profundidad. En general se pudo observar que el rendimiento no decrece de manera muy marcada a medida que disminuye el contenido de P asimilable. Por debajo del rango de 8 ppm, la probabilidad de respuesta a la fertilización con P es alta.

Para el S no se ha llegado a generar modelos de diagnóstico que permitan predecir una deficiencia de este nutriente en el cultivo de soja. En general en los ensayos realizados a nivel nacional no se han encontrado relación con el nivel de sulfatos en el suelo a la siembra y la respuesta del cultivo. Se recomienda que en aquellos sitios donde se generen respuestas a la fertilización azufrada, se fertilice en los años sucesivos con este nutriente. Los lotes que presenten un bajo contenido de MO y no tengan la influencia de una napa pueden presentar respuestas a este nutriente.

Fertilización en pasturas

El N y el P son los nutrientes que con mayor frecuencia limitan la productividad de la alfalfa y otros cultivos en la Región Pampeana (Díaz Zorita 1997; Berardo y Marino 2005). Para lograr un incremento de la producción ganadera es necesario que las pasturas ofrezcan elevados rendimientos de forraje de alta calidad a lo largo del ciclo productivo. Esto requiere de un adecuado abastecimiento de nutrientes (Berardo y Marino 2005).

Entre 1994 y 1999 se instalaron 20 experimentos de fertilización de pasturas en el sur de la Provincia de Córdoba, este de la Provincia de La Pampa y oeste de la Provincia de Buenos Aires (Tabla 6) (Bono y Álvarez 2012b). Los suelos fueron Haplustoles Enticos (n=9) y Hapludoles Típicos (n=11). En casi todos los sitios eran profundos, (mas de 200 cm, n=18), en un sitio de profundidad intermedia (140 cm) y en otro sitio poco pro-

	Nitrógeno orgánico (%)	Fósforo extractable (ppm)	pH	Precipitación (mm año^{-1})	Cosecha (Cortes año^{-1})
Promedio	0.12	24.2	6.0	959	5
Mínimo	0.06	5.2	5.3	659	3
Máximo	0.20	50.5	6.8	1571	8

Tabla 6. Algunas características de los suelos, de los experimentos y precipitaciones medias durante los períodos de medición.

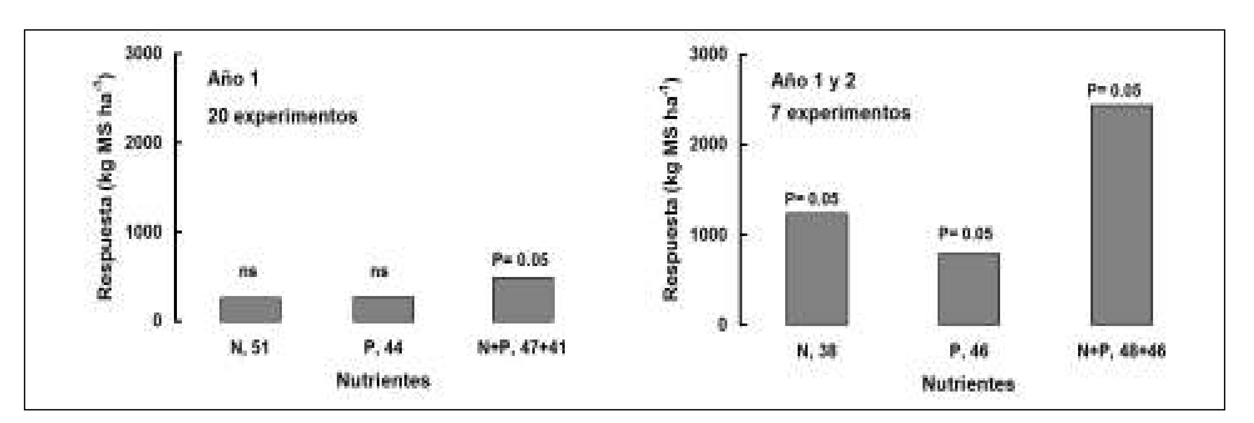


Figura 13. Respuesta media de la red experimental a la fertilización con N, P y sus combinaciones en el primer año de trabajo y acumulada en el primer y segundo año. N= nitrógeno, P = fósforo, N+P = nitrógeno y fósforo aplicado al mismo tratamiento. Los números junto a los nutrientes indican la dosis media recibida por el tratamiento. ns= no significativo.

fundo (80 cm). El sistema de labranza fue con rastras y discos y las siembras se realizaron entre de marzo y mayo en todos los casos. Se siguió el manejo del cultivo adoptado por el productor. La composición de la pastura fue un acompañante de avena o centeno, alfalfa y una o dos gramíneas cebadilla, pasto ovillo, agropiro o festuca. Las pasturas se manejaron con pastoreo rotativo y cortes para henificación. Para evitar contaminaciones y mezcla de efectos en los tratamientos debido a un pastoreo prolongado los animales no permanecieron en las parcelas más de un día.

El primer año solo hubo respuesta significativa a la aplicación conjunta de N y N (Figura 13). La respuesta acumulada a la fertilización en el primer y segundo año fue muy superior y significativa, tanto para fertilizaciones con N o P por separado como con sus combinaciones (Figura 13). Numerosos trabajos observaron respuesta a P en pasturas consociadas y alfalfas puras en la Región Pampeana. En esta red, además, se produjo respuesta a N y a la combinación de nutrientes.

Para producir 1 kg de carne son necesarios 15 kg MS de forraje (García et al. 1999). Se realizó la evaluación económica de la fertilización para las respuestas observadas a los dos años de la fertilización (Morón 2008). Para el período 1980-2010 el costo promedio del nitrógeno aplicado (urea) fue \$ 3.7 kg^{-1} y el P aplicado (fosfato diamónico) \$ 10.8 kg^{-1} (Agromercado 2011). Para el mismo período se calculó un precio neto promedio (ternero) de \$ 2.80 kg^{-1} . Con esto precios medios fue rentable la fertilización nitrogenada pero no la fosforada o combinada. Sin embargo. Debe considerarse que solo se evaluó respuesta durante dos años en pasturas de cuatro años de duración y que las dosis aplicadas de P fueron altas. Lo que pudo determinar una baja eficiencia agronómica (Álvarez 2007b).

Aspectos más importantes a tener en cuenta en la fertilización de los distintos cultivos de la región:

- El desafío para la nutrición y fertilización es doble: Sustentabilidad y Productividad.
- El balance de nutrientes en la región sigue siendo negativo.
- Los análisis de suelo son el primer elemento para realizar diagnósticos o recomendaciones para fertilizar.
- El agua y el N son los principales componentes a tener en cuenta.
- Las necesidades nutricionales de los cultivos dependen de los niveles de rendimiento.

Trigo

- La dosis de N económicamente óptima depende de la relación de precios fertilizante/grano.
- La dosis de N a aplicar debe determinarse sobre la base de la relación de precios fertilízante/grano y el contenido de N de NO-3 del suelo en los primeros 60 cm del perfil.
- La eficiencia agronómica de la red experimental, estimada usando el modelo desarrollado, fue baja. Cuando la relación de precios es alta (7-8 o más) no conviene fertilizar en la región.
- Las respuestas promedio de la red fueron similares a la siembra o el macollaje.

Girasol

- Los resultados obtenidos indican que el girasol responde económicamente a dosis bajas de N aplicadas a la siembra o en forma diferida, y sin efecto de la fuente usada, en la RSP.
- Por el contrario, la fertilización fosforada no es recomendable desde el punto de vista económico. La decisión de aplicar P a este cultivo puede pasar más por la intención de mantener el nivel de P asimilable del suelo que por el retorno económico inmediato de la inversión.

Boro en girasol

- Aún no se presenta un buen método de diagnostico que nos permita identificar sitios con alta posibilidad de respuesta.
- Las respuestas de B entre lugares y años son muy aleatorias. Otras variables tienen una mayor influencia en el rendimiento como, la cantidad de agua útil en el perfil, disponibilidad de N, P, aporte de napa freática, etc.
- No se presentan diferencias en el momento de aplicación de B y esta decisión estaría en mayor medida influenciada a cuestiones de manejo, tales cómo, aplicación junto a un fungicida, herbicida, etc.
- El uso de micronutrientes solos y combinados representan una necesidad actual en regiones alta producción.

Maíz

- Hubo respuesta significativa del maíz a la fertilización nitrogenada.
- La eficiencia agronómica promedio fue de 28 kg grano kg^{-1} N para un rango de dosis de 40-60 kg N ha^{-1}.

• No hubo respuesta a P ni a S, ni interacción entre nutrientes.

Pasturas

• Hubo respuestas significativas a N, P y a la aplicación conjunta de ambos nutrientes en pasturas consociadas de la RSP.

Tipos y fuentes de fertilizantes

Los fertilizantes se pueden clasificar en (Melgar et al. 2012):

Simples: aquellos que suministran un único nutriente principal, por ejemplo Urea y Superfosfato triple.

Binarios: aquellos que suministran dos nutriente, por ejemplo sulfato de amonio, fosfato diamónico

Compuestos o multinutrientes: suministran varios nutrientes. Pueden ser gránulos mezclados químicamente entre diversas materias primas y productos semiacabados, que dan como resultado la concentración proporcional y prácticamente constante de cada gránulo de los elementos nutritivos. Las mezclas físicas son fertilizantes que contienen dos o más nutrientes primarios obtenidos a partir de la mezcla mecánica dos o más fertilizantes que no son reactivos químicamente entre sí, o que reaccionan en forma mínima. Por definición las mezclas físicas de fertilizantes son materiales compatibles por su tamaño.

Nitrogenados

Amoníaco anhidro: cambia de líquido a gas cuando se pone en contacto con el suelo, 82 % de N

Nitrato de amonio: 32 - 34 % de N

Nitrato de amonio calcáreo (CAN): 27 % de N

Nitro doble: 27 % de N, 6 % de Ca, 4 % de Mg y 6 % de S

UAN: líquido y varia de 30 a 32 % N

Urea: 46 % de N

Fosforados sólidos más comunes

Fosfato diamónico (FDA): 18 % de N y 46 % de P_2O_5 (20 % de P).

Fosfato monoamónico (MAP): 11 % de N y 51 % de P_2O_5 (23 % de P).

Superfosfato triple (SFT): 46 % de P_2O_5 (20 % de P).

Superfosfato simple (SPS): 21 % de P_2O_5 (9 % de P) y 12 % de S.

Potasicos

Cloruro de potasio: 60 % de K_2O (50 % de K)

Nitrato de potasio: 44 % K_2O (36 % de K) y 13 % de N.

Nitrato de sodio y potasio: 14 % K_2O (12 % de K) y 15 % de N.

Sulfato de potasio: 50 % K_2O (42 % de K) y 18 % de S.

Sulfato de potasio y magnesio (Sulpomag): 22 % de K_2O (18 % de K), 22 % de S y 11 de Mg.

Azufrados

Azufre elemental: 80 – 95 % de S.

Sulfato de amônio: 24 % de S y 21 de N

Sulfonitrato de amônio: 12 % de S y 26 de N

Tiosulfato de amônio: 26 % de S y 12 de N

Yeso agrícola: 17 % de S y 22 % de Ca.

Cálcicos

Calcitas – Carbonato de cálcio: 40 % de Ca.

Magnésicos

Dolomita: 7 % de Mg y 21 % de Ca.

Micronutrientes

Fertilizantes con, Mn, Cu, Fe, Mo, Zn.

Fertilizantes líquidos para aplicar al suelo

Nitrogenados: UAN, varía de 30 a 32 % N

Niltro-azufrados: Sulfato de amonio, Tiosulfato de amonio

Nitro-fosforados: Polifosfatos de amonio y urea

Potásicos (Tiosulfato de potasio) y mezclas NPK, pueden incluir nutrientes secundarios como S, Mg y micronutientes.

Se debe aclarar que el contenido se expresa en porcentaje de nutriente sobre peso o sobre volumen, debe existir una densidad a una temperatura de referencia que la caracterice. La densidad da una idea de la cantidad total de nutrientes en el volumen.

Líquidos para aplicaciones foliares

Pueden contener N, P, S, Zn y B

Fertilizantes de liberación lenta y/o controlada

Los fertilizantes de liberación lenta y/o controlada son aquellos que contienen nutrientes de manera tal, que retrasan su disponibilidad para las plantas luego de su aplicación, o que están disponibles más tarde que otros fertilizantes tomados como referencia y considerados rápidamente disponible.

Uso de fertilizantes en la provincia de La Pampa

Trigo: Es el cultivo más fertilizado en la región (Montoya et al. 1999). En LC hubo un incremento del 42 % al 55 % desde el 2000 al 2003 en la superficie fertilizada (Lorda et al. 2003a). Esos porcentajes de fertilización en la provincia de La Pampa son similares en la actualidad (Belmonte et al. 2010). En SD casi toda la superficie se fertiliza (81 %), mientras que en LC es mucho menor (22 %). La elección de fertilizar a la siembra (41 %) y fraccionado (39 %) prevalecen respecto a presiembra (4 %), preemergencia (4 %) y al macollaje (12 %) (Belmonte et al. 2010). El fertilizante más empleado es la urea, en menor magnitud el FDA, la mezcla FDA+urea, N + S líquido, MAP, UAN, Nitrocomples y Sulfato de amonio. El uso de FDA se realiza exclusivamente a la siembra en dosis de 30 a 80 kg ha-1 y cuando se usa FDA+urea generalmente se aplica el FDA a la siembra y la urea al macollaje o sino se aplican ambas a la siembra (Montoya et al. 1999). En las últimas campañas se ha observado un aumento en el uso de fertilizantes líquidos (Lorda et al. 2003a).

Maíz: La información presentada en la campaña 2001/2002 indica que un 82 % de la superficie sembrada en SD fue fertilizada a la siembra, mientras en LC se fertilizo el 11 % también a la siembra (Lorda et al. 2003b). En algunas ocasiones es fertilizado con 30 a 100 kg de urea ha^{-1} en estado de 4-6 hojas, con FDA a la siembra en dosis de 30 a 100 kg ha^{-1} o con FDA+urea a la siembra y al escardillo, respectivamente (Montoya et al. 1999).

Girasol: Según encuestas de la campaña 2006/07 del total de la superficie sembrada se fertilizó el 39 % en LC y un 85 % en SD (Belmonte et al. 2008). El momento de aplicación que prevalece en ambos sistemas de labranza, es a la siembra (90 %) y luego el fraccionado siembra y estado vegetativo (6 %). La fertilización se basa en dosis de 30-50 kg ha^{-1} de FDA y 40 a 50 kg ha^{-1} de N como urea a la siembra. En menor proporción se aplica urea al estado de 4-6 hojas del cultivo con dosis que oscilan entre 50-70 kg ha^{-1} de N como urea o 107 l ha^{-1} de UAN (Montoya et al. 1999, Lorda et al. 2003b).

Verdeos de invierno: La fertilización más común es con urea a la siembra, en dosis de 40 a 70 kg de N ha^{-1}. Las pasturas perennes son fertilizadas a la siembra con dosis reducidas de FDA.

Según la encuesta realiza por Montoya et al. (1999) la decisión de fertilizar se basa fundamentalmente en análisis de suelo, cultivo antecesor, relación insumo producto, y método de diagnostico regional como es el caso del trigo.

Bibliografía

- Agromercado. 2011. Nº 310, Síntesis económica, 64 pág.
- Anuario estadístico de la provincia de La Pampa. 2009. Dirección de estadísticas y censos. 219 pág.
- Álvarez R. 1999. Uso de modelos de balance para determinar los requerimientos de fertilizante nitrogenado de trigo y maíz. Editorial EUDEBA. 58 paginas.
- Álvarez R. 2005a. Capítulo 5. Fertilización de trigo. Pág.91-110. En Fertilización de cultivos de granos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía (UBA).
- Álvarez R. 2005b. Capítulo 7. Fertilización de maíz. Pág.131-154. En Fertilización de cultivos de granos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía (UBA).
- Álvarez R. 2007a. Fertilización de maíz. Capítulo 9. In: Fertilización de cultivos de granos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. (Eds) Facultad de Agronomía UBA. 131-156 pág.
- Álvarez R. (Ed.) 2007b. Fertilización de cultivos de granos y pasturas. Diagnóstico y recomendación en la región pampeana. Editorial Facultad de Agronomía-UBA, 223 pág.
- Alvarez R y H. S. Steinbach. 2006. Salidas de nitrógeno del agrosistema. En Materia orgánica: valor agronómico y dinámica en suelos pampéanos, Cap. 9. Ed. R. Álvarez. Pág. 99-121. Editorial Facultad de Agronomía-UBA, Buenos Aires, Argentina.
- Álvarez R., C. Álvarez y H. Steinbach. 2000. Fertilización de trigo y maíz. Editorial Hemisferio Sur. Buenos Aires. 95 paginas.
- Álvarez R, C Álvarez y H. S. Steinbach. 2000. Fertilización de trigo y maíz. Ed. Hemisferio Sur, 95 pág.
- Álvarez C, N. Peinemann y A. Quiroga. 2006. Sistemas de labranza, propiedades edáficas y rendimiento de maíz en molisoles diferenciados por el régimen hídrico. In: Aspectos de la evaluación y el manejo de los suelos en la región semiárida pampeana. Publicación Técnica Nº 67. EEA Anguil INTA. 1-10 pág.
- Barbagelata P. 2000. Efecto del momento de aplicación del fertilizante nitrogenado sobre el rendimiento de maíz en

siembra directa. Informe de Beca. INTA EEA Paraná, Área de investigación en suelos.
• Barraco M y M. Díaz – Zorita. 2005. Momento de fertilización nitrogenada de cultivos de maíz en Hapludoles Típicos. Ciencia del Suelo 23 (2): 197-203.
• Barraco M y M. Díaz – Zorita. 2006. Fertilización postergada de nitrógeno en maíz en la región de la Pampa Arenosa. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Actas 5 pág.
• Belmonte M. L, M. Fernández, Y. Bellini Saibene, H. Lorda,L. R. Schaab y J. C. Fernández. 2008. Capítulo 2: Caracterización tecnológica y productiva del cultivo de girasol para la provincia de La Pampa. In: El cultivo de girasol en la región semiárida pampeana. Publicación Técnica Nº 72. Páginas 13-26.
• Belmonte M. L, M. Fernández, Y. Bellini Saibene, H. Lorda, M. Fuentes, A. Rossi, J. Garay y R. Rivarola. 2010. Capítulo 2: Caracterización tecnológica y productiva del cultivo de trigo y otros cereales de invierno para la Región Semiárida Pampeana Central. In: El cultivo de trigo en la región semiárida y subhúmda pampeana. Publicación Técnica Nº 79. Páginas 13-31.
• Berardo A. 2005. Efectos directos y residuales de la fertilización en maíz: resultados de la red de nutrición CREA Sur de Santa Fe. Actas VIII Congreso Nacional de Maíz, pág. 154-157.
• Berardo A y M. A. Marino. 2005. Pasturas y pastizales naturales. Capítulo 16. In: Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Eds: H Echeverría & FO García. 335-364 pág.
• Bono A. 2005. Dosis y momentos de aplicación de nitrógeno en girasol en la región semiárida pampeana. Presentado al 3 er Congreso de Girasol. Buenos Aires 31 de mayo y 1 de junio de 2005.
• Bono A. y A. Quiroga. 2003. Avances en el ajuste de la fertilidad en el cultivo en la región semiárida y subhúmeda pampeana. In: Trigo. Actualización 2003. Boletín de Divulgación Técnica Nº 76. pp 17-32.
• Bono A. y C. Scianca. 2003. Fertilización de maíz. Resultados obtenidos en tres años de ensayos en el oeste bonaerense. Aplicación de macro y micronutrientes. In: Cultivos de cosecha gruesa. Actualización 2003. Publicación Técnica Nº 77. 79-84 pág.
• Bono A. y R. Alvarez. 2006. Rendimiento de trigo y respuesta a la fertilización en la región semiárida y subhúmeda pampeana. XX Congreso argentino de la Ciencia del Suelo. Salta 2006.
• Bono A. y R. Alvarez. 2007a. Mineralización de nitrógeno del suelo en la región semiárida pampeana. In: aspectos de la evaluación y el manejo de los suelos en la región semiárida pampeana. Ensayos de Larga Duración. Boletín Técnico Nº 69. EEA Inta Anguil. pp 65-76.
• Bono A. y R. Alvarez. 2007b. Estimación de nitratos en profundidad en suelos de la región semiárida y subhúmeda pampeana. INFORMACIONES AGRONOMICAS DEL CONO SUR Nº 35. pp 1-5.
• Bono A. y R. Alvarez. 2007c. Recomendaciones de fertilización para girasol en las regiones semiárida y subhúmeda pampeanas. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. IPNI nº 35. pp 1-5
• Bono A. y R. Alvarez. 2012 a. Fertilización de maíz en la región semiárida y subhúmeda pampeana. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata 16 al 20 de abril de 2012.
• Bono A. y R. Alvarez. 2012b. Fertilización en pasturas en la región semiárida y subhúmeda pampeana. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata 16 al 20 de abril de 2012.
• Bono A. y N. F. Romano. 2011. Boro en Girasol en la región semiárida y subhúmeda pampeana. Revista Agromercado Nº 164 Julio 2011 pag 16-18.
• Bono A., E. Sá Pereira y M. Barraco. 2005. Fertilización postergada con nitrógeno en la región semiárida y subhúmeda pampeana. Presentado al 3 er Congreso de Girasol. Buenos Aires 31 de mayo y 1 de junio de 2005.
• Bono A., J. C. Montoya, P. Lescano y F. J. Babinec. 1997. Fertilización del trigo con nitrógeno y fóforo en la región semiárida pampeana. Campaña 1996. Publicación Técnica Nº 47. EEA Anguil INTA.
• Capurro J, C. Fiorito, M. C. González, E. Casasola, A. Zazzarini, J. Andriani y A. Vernizzi. 2007. Respuesta del cultivo de maíz a la fertilización con nitrógeno, fósforo y azufre en el sur de Santa Fé. Informaciones Agronómicas Nº 36. 17-24 pág.
• Ciampitti I. y F. García. 2007. Requerimientos nutricionales. Absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. Informaciones Agronómicas del Cono Sur. Nº 33, 13-16.
• Díaz Zorita M. 1997. Forrajeras. Pasturas mixtas templadas. In: La fertilización de cultivos y pasturas. Ed Hemiferio Sur. 161:173.
• Echeverría E, G. Ferraris, G. Gerster, F. H. Gutierrez Boem y F. Salvagiotti. 2002. Fertilización en soja y trigo-soja: respuesta a la fertilización en la región pampaena resultados de la red de ensayos del proyecto fertilizar-INTA VCampaña 2001/2002. EEA INTA Pergamino, 44p. (Disponible on line en www.fertilizar.org.ar).
• Fagioli M., Bono A. y H. Torroba Gentilini. 1982. Productividad de los cultivos de trigo en la región semiárida pampeana. Publicación Técnica Nº 24. EEA Anguil INTA.
• Ferrari, M. C, J. J. Ostojic, G. N. Ferraris, L. A. Ventimiglia, H. C. Carta y S. N. Rillo. 2001. Momento de aplicación de fertili-

zante nitrogenado en maíz en siembra directa. VII Congreso Nacional de Maíz. Pergamino 7 al 9 de noviembre de 2001.
• Ferraris G, F. Gutierrez Boem, P. Prystupa, F. Salvagiotti, I. Couretot y D. Dignan. 2005. Fertilización azufrada en maíz en la Pampa Ondulada. VIII Congreso Nacional de Maíz (Argentina), Actas pág. 162-165.
• García F. O, M. Ruffo, I y C. Daverede. 1999. Fertilización de Pasturas y verdeos. Informaciones Agronómicas. INPOFOS. Vol. 1 Nº 1. pág 2-11.
• García F, M. Boxler, J. Minteguiaga, H. Blanco, R. Houssay, G. Deza Marin y A. Berardo. 2005. Efectos directos y residuales de la fertilización en maíz: resultados de red de nutrición CREA Sur de Santa Fé. Actas VIII Congreso Argentini de Maíz. Pág. 154-157.
• González M., Peticari A, Stegman de Gurfinkel B, y Rodríguez Cáceres E. 1997. El cultivo de la soja en la Argentina. INTA Manfredi-INTA Marcos Juárez.448pp. Argentina.
• Hungria M, Campo R. J, y Carvalho Mendes I. 2001. Fixacao biológica do nitrógeno na cultura de soja. Circular Técnica EMBRAPA Soja. 48pp.Brasil.
• Lorda H., Lucchetti P., Bellini Saibene Y., Sipowicz A., Lucchetti P., Zinda R. y C. Coma. 2003a. Caracterización Tecnológica del Cultivo de Trigo. In: Trigo Actualización 2003. Boletín de Divulgación Técnica Nº 76. EEA INTA Anguil. Pag 131-176.
• Lorda H.; Bellini Saibene Y.; Sipowicz A., Lucchetti P.; Zinda R., Farell M.; A. Corró Molas. 2003b. Caracterización Tecnológica del Cultivos de verano. In: CULTIVOS DE COSECHA GRUESA. Actualización 2003. Boletín de Divulgación Técnica Nº 77. EEA INTA Anguil. Pag 1-38.
• Megar R. y M. Díaz Zorita. 1997. La fertilización de cultivos y pasturas. Editorial Hemiferio Sur. Buenos Aires. 260 paginas.
• Megar R., M. Torres Duggan y M. E. Camozzi. 2012. Guia de fertilizantes, enmiendas y productos nutricionales. Fertilizar. 202 paginas.
• Montoya J. C., Babinec F. J., Rodriguez N. M., Pérez Fernández J., y A. Bono. 1999. Uso de Agroquímicos en la provincia de La Pampa. Boletín de Divulgación Técnica Nº 66. EEA Anguil INTA.
• Montoya J. C., Bono A., Barraco M., y Díaz Zorita M. 2003. Boro, un nutriente que crea incertidumbre: experiencias de fertilización en la región pampeana. Boletín de Divulgación Técnica Nº 78. EEA Anguil INTA.
• Morón A. 2008. Fertilización de pasturas: respuesta y relación de precios para la producción de carne y leche. Informaciones Agrómicas del Cono Sur. IPNI. Nº 40. 21-25 pág.
• Pagani A, H. E. Echeverría, P. A. Barbieri y H. R. Sainz Rozas. 2008. Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el oeste bonaerense. Informaciones Agronómicas Nº 39. 14 - 19 pág.
• Prystupa P, F. Salvagiotti, G. Ferraris y F. Gutierrez Boem. 2006. Fertilización de maíz en el note de Buenos Aires sur de Santa Fe: interacción fósforo x azufre. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas en CD.
• Quiroga A., Ormeño O., Fernández J., Vallejos A. y E. Adema. 1995. Fertilización de verdeos de invierno. Revista CREA. 171:36-40.
• Quiroga A, A. Bono, J. Montoya y F. J. Babinec. 1997. Aspectos edáficos y de manejo relacionado con la productividad del cultivo de maíz. Informe Técnico EEA Anguil, INTA.
• Racca R. W. 2002 Fijación Biológica del Nitrógeno. X Congreso Nacional de AAPRESID. (I):197-208.Rosario. Santa Fe. Argentina. 13 al 16 de Agosto 2002. Argentina.
• Sainz Rozas H., Echeverría H., Eyerabide M., Barracco M., Ferrari G., y H Angelini. 2012. Niveles de Boro disponible en suelos de La región pampeana argentina. XIX Congreso Latinoamérica de la Ciencia del Suelo y XXIII Argentino de la Ciencia del Suelo. 16 al 20 de abril Mar del Plata. Actas del Congreso en CD.
• Síntesis económica. 2010. Revista Agro mercado. Nº 298, 72 pág.

Nicolás Romano

Fertilizantes aplicados en la línea de siembra

Los fertilizantes pueden aplicarse con maquinas fertilizadoras, sembradoras o equipos de riego. Estos permiten la ubicación del fertilizante en distinta localización en el suelo (al voleo o incorporado) y en momentos específicos del cultivo (pre-siembra, siembra y post-emergencia). A su vez, hay equipos que siembran y fertilizan en el mismo momento. Las sembradoras-fertilizadoras son maquinas que dosifican, conducen y distribuyen ambos insumos: semilla y fertilizante. Estos desarrollos se caracterizan por su sencillez, bajo costo y las ubicaciones posibles del fertilizante en relación a la semilla puede ser variada (Figura 1) (Alvarez et al. 2007).

Las aplicaciones de fertilizantes en el momento de la siembra pueden realizarse al voleo, en banda incorporada o con la semilla. Estas últimas aplicaciones junto con la semilla incluyen a los fertilizantes tipo arrancadores, o también las realizadas con maquinaría utilizadas para la siembra de grano fino y equipos que quedaron obsoletos por el paso del tiempo. La práctica de fertilización realizada correctamente provoca efectos beneficiosos sobre los cultivos ya que favorecen la implantación, se obtienen aumentos de rendimientos y generalmente mejora la calidad del producto, etc.

Sin embargo hay situaciones en que su impacto sobre los cultivos puede ser perjudicial. Dentro de estos efectos negativos incluye desde el retardo de la germinación, hasta la muerte de la semilla y en algunos casos en un estadio más avanzado la muerte de plántulas. La gravedad de los efectos de la fitotoxicidad de los fertilizantes tiene un comportamiento diferencial dependiendo del tipo de cultivo, producto y dosis aplicado, disponibilidad hídrica, textura del suelo, etc.

Tolerancia según especies

Existe una clasificación de la tolerancia de las distintas especies en relación a la presencia de amoniaco (NH_3) durante en proceso de germinación (Tabla 1). Se puede observar que la tolerancia varía según la etapa de crecimiento. En general la gran mayoría de los cultivos tiene una menor tolerancia en los estadios iniciales, aumentando en estadios posteriores. La excepción es el cultivo de trigo ya que posee una menor tolerancia en el estado de radícula que durante la germinación.

Tabla 1. Tolerancia de las especies a la concentración de amoniaco durante la germinación y el crecimiento de la radícula. Dowling 1993.

Especie	Germinación	Radicula
Cebada	Tolerancia media	Tolerancia media
Trigo	Tolerancia media	Tolerancia baja
Maíz	Tolerancia media	Tolerancia media
Girasol	Tolerancia media	Alta tolerancia
Sorgo	Tolerancia media	Alta tolerancia
Canola	Toleran cia baja	Tolerancia media

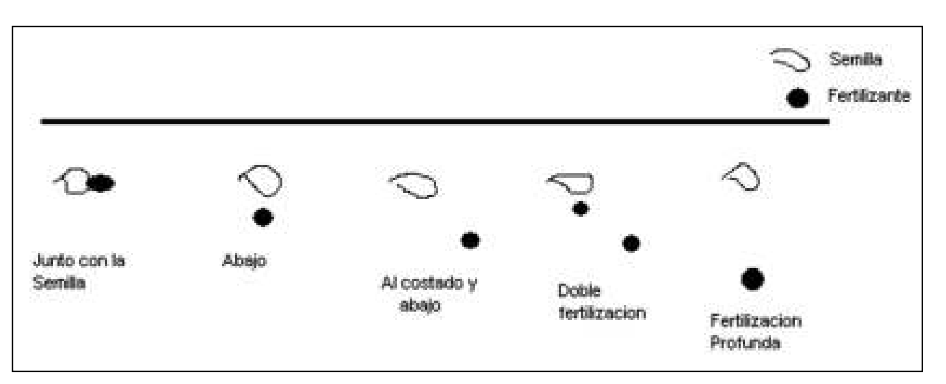


Figura 1. Ubicaciones posibles del fertilizante en relación a la semilla (Adaptado de Alvarez et al. 2007).

Tabla 2. Índices Salinos de los principales fertilizantes. Mortvedt et al. (1999).

Fertilizante	Indice salino
Fertilizantes Nitrogenados	
Nitrato de amonio	105
Urea	75
UAN	74
Fertilizantes Fosforados	
Fosfato diamónico	34
Fosfato monoamónico	30
Superfosfato triple	10
Fertilizantes Potásicos	
Cloruro de potasio	116
Nitrato de potasio	74
Sulfato de potasio	46
Fertilizantes Azufrados	
Sulfato de magnesio	116
Sulfato de amonio	69

Efecto fitotóxicos según tipo de fertilizante

Existen dos efectos más importantes que generan los fertilizantes al ser aplicados al suelo dependiendo su composición intrínseca del mismo:

Efecto salino que crea un stress hídrico para la plántula ya que tanto la sal propia del fertilizante y la semilla están compitiendo por el recurso agua. Estas sales producen una disminución del potencial osmótico y por consiguiente del potencial agua, que genera una restricción de agua para la plántula. La capacidad de disminuir el potencial osmótico es diferente según la fuente de fertilizante empleada y es cuantificado por el "índice salino". El índice salino indica el incremento de la presión osmótica producido por un peso igual de fertilizante relativo al nitrato de sodio (Mortvedt et al. 1999). En la Tabla 2 se presentan los índices salinos para los fertilizantes más usados, como se puede observar las sales de N y K tienen un mayor índice salino que las de P.

Efecto tóxico por NH3 (Amoníaco)
La toxicidad por los fertilizantes amoniacales producida por la liberación de NH_3 a niveles tóxicos. La Urea y FDA incrementan el pH en la zona de reacción con el suelo a valores de hasta 9.5 y 8.5 respectivamente.

Disponibilidad hídrica del suelo

El contenido de agua al momento de la siembra puede ser un factor determinante del número de plantas logradas cuando el fertilizante es aplicado en la línea de siembra del cultivo. A medida que aumenta en contenido de humedad se reducen el efecto salino de los fertilizantes al diluirse la concentración de sales en la solución del suelo. En el caso de los fertilizantes amoniacales, el amoniaco tiene gran afinidad por el agua e inmediatamente pasa a amonio reduciéndose el perjuicio ocasionado por estos fertilizantes.

Tipo de suelo

El tipo de textura y los contenidos de MO son factores que repercuten en la dosis máxima que se puede aplicar. El tipo textura y el contenido de MO influye en el valor de la CIC. A medida que aumente la CIC mayor será la dosis que se podrá aplicar. Cuanto mayor sea el contenido de arena de los suelos más susceptibles son estos a sufrir problemas de fitotoxicidad ya que aumenta la conductividad de las sales.

Espaciamiento entre hileras

La dosis de fertilizante que se pueden aplicar en la línea de siembra decrece al incrementarse el espaciamiento entre surcos. Por ejemplo para aplicar una misma cantidad de fertilizante por unidad de super-

Tratamientos		% Elemento		kg de Elememto/ha	
Fuentes	Fert. (Kg/ha)	N	P	N	P
Testigo	0			0	0
Urea	43	0.46		20	0
Urea	87	0.46		40	0
Nitro Doble	83	0.24		20	0
Nitro Doble	167	0.24		40	0
FDA	50	0.18	0.2	9	10
FDA	100	0.18	0.2	18	20

Tabla 3. Tratamientos realizados en el ensayo de invernáculo para los cultivos de trigo y girasol.

ficie, en el caso de los distanciamientos mayores la cantidad de fertilizante aplicado en la línea será mayor que cuando son aplicados con menores distanciamientos.

Ensayos realizados en la EEA Anguil INTA

En el año 2006 se realizo un ensayo exploratorio para evaluar el comportamiento de diferentes fuentes de fertilizantes aplicadas en la misma línea de siembra en los cultivos de trigo y girasol (Pelayo 2010). El ensayo se realizó bajo invernáculo utilizando dos tipos de suelos de la región uno arenoso (Ustipsamente) y otro franco arenoso (Haplustol). En la siguiente Tabla se observan los diferentes tratamientos realizados.

La cantidad de fertilizante a aplicar se calculó teniendo en cuenta las dosis y la separación de 0.70 y 0.175 metros utilizados a campo para el cultivo de girasol y trigo respectivamente. Al inicio del macollamiento en trigo (Figura 2a y 2b) y emergencia de cotiledones en girasol (Figura 3 a y b) se evaluó el número de plantas logradas en los distintos tratamientos.

En el caso del trigo la urea provocó alta fitotoxicidad, qué generó una alta reducción en el número de plantas emergidas. La misma dosis de N con otra fuente (Nitro doble) no causó reducción en la emergencia de plántulas.

En el cultivo de girasol el problema de fitotoxicidad fue más acentuado. Teniendo en cuenta que su distanciamiento de siembra es mucho mayor que el trigo, la cantidad de fertilizante que se coloca en la línea es mucho más alta. Las tres fuentes de fertilizantes causaron fitotoxicidad. En el caso de la urea los resultados fueron mucho más marcados.

De todas maneras hay que tener en cuenta que las condiciones del ensayo no son las mismas a las que se efectúan en condiciones de campo. Efectos como la remoción que produce la cuchilla de la sembrado-

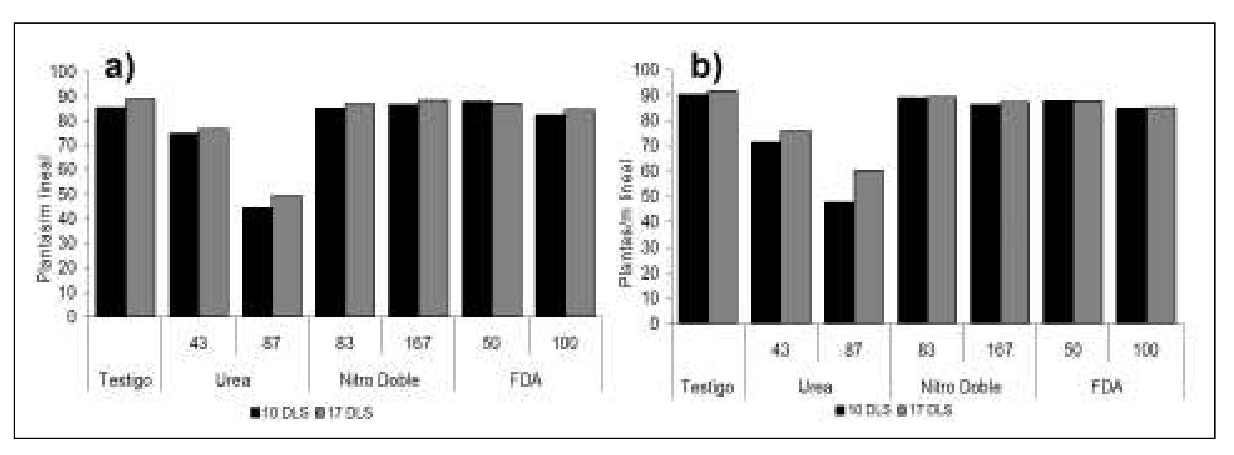


Figura 2. Número de plantas de trigo por metro lineal logradas en el suelo arenoso (a) y en el franco arenoso (b), para 10 y 17 días luego de la siembra. DLS: Días luego de la siembra.

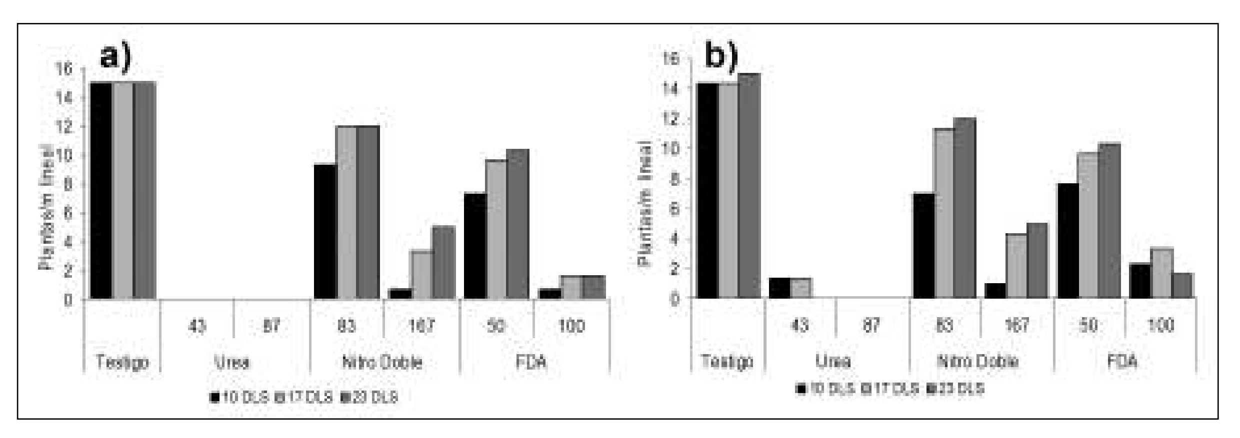


Figura 3. Número de plantas de girasol por metro lineal logradas en el suelo arenoso (a) y en el franco arenoso (b), en 10, 17, 20 días luego de la siembra. Días luego de la siembra.

ra, y la forma de deposición del fertilizante generan que el contacto entre la semilla y el fertilizante no sean los mismos.

Dosis máximas orientativas para los diferentes cultivos

A continuación se muestran las dosis máximas posibles de fertilizante para aplicar "en la misma línea de la semilla". Son dosis orientativas para cada cultivo, con las distintas fuentes de fertilizantes utilizadas. Hay que tener en cuenta que dependen de todas las variables anteriormente expresadas.

- En el caso del SFT y FMA, con los espaciamientos utilizados en el cultivo de trigo, no existirían problemas de fitotoxicidad.

- El cultivo de maíz puede presentar mayores riesgos debido a su baja capacidad compensatoria generada en una reducción en el número de plantas.

- Siembras con bajo contenido de agua en el perfil, en suelos muy arenosos y con distanciamientos a 70cm pueden agravar la situación.

- Siembras con bajo contenido de agua en el perfil, en suelos muy arenosos y con distanciamientos a 70 cm pueden agravar la situación

- En el caso del cultivo de soja, con estas dosis de FDA, en condiciones de baja humedad, se puede presentar una reducción del número de plantas. En general no se presentarían reducciones de rendimiento significativas.

Trigo				
Tipo de Fertilizante	Suelo Francos		Suelos Arenosos	
	Kg ha^{-1} de Fert.	Kg ha^{-1} N	Kg ha^{-1} de Fert.	Kg ha^{-1} N
Urea	50	25	26-33	15
FDA	120	25	75	15
SFT	120*	-	120*	-
FMA	120*	-	120*	-

Tabla 4. Dosis máximas orientativas para el cultivo de trigo a utilizar en la misma línea del cultivo según las distintas fuentes de fertilizantes.

FDA: Fosfato diamónico
SFT: Súper fosfato triple de calcio
FMA: Fosfato monoamónico

Maiz				
Tipo de Fertilizante	Suelo Francos		Suelos Arenosos	
	Kg ha^{-1} de Fert.	Kg ha^{-1} N	Kg ha^{-1} de Fert.	Kg ha^{-1} N
Urea	30	14,7	20	9,8
FDA	80	16,8	60	12,6
SFT	100	-	80	-
CAN	100	21	80	16,8
FMA	120	14,4	100	12

Tabla 5. Dosis máximas orientativas para el cultivo de maíz a utilizar en la misma línea del cultivo según las distintas fuentes de fertilizantes.

FDA: Fosfato diamónico
SFT: Super fosfato triple de calcio
FMA: Fosfato monoamónico
CAN: Nitrato de amonio calcáreo

Girasol				
Tipo de Fertilizante	Suelo Francos		Suelos Arenosos	
	Kg ha^{-1} de Fert.	Kg ha^{-1} N	Kg ha^{-1} de Fert.	Kg ha^{-1} N
UREA	25	12,3	15	7,4
CAN	50	10,5	30	6,3
FDA	60	12,6	40	8,4
SFT	100	-	80	-
FMA	80	9,6	60	7,2

Tabla 6. Dosis máximas orientativas para el cultivo de girasol a utilizar en la misma línea del cultivo según las distintas fuentes de fertilizantes.

FDA: Fosfato diamónico
SFT: Súper fosfato triple de calcio
FMA: Fosfato monoamónico
CAN: Nitrato de amonio calcáreo

Soja				
Tipo de Fertilizante	Suelo Francos		Suelos Arenosos	
	Kg ha^{-1} de Fert.	Kg ha^{-1} N	Kg ha^{-1} de Fert.	Kg ha^{-1} N
FDA	40	8,4	30	6,3
SFT	120	-	100	-
SFS	120	-	100	-
FMA	60	7,2	40	4,8

Tabla 7. Dosis máximas orientativas para el cultivo de soja a utilizar en la misma línea del cultivo según las distintas fuentes de fertilizantes.

FDA: Fosfato diamónico
SFT: Súper fosfato triple de cálcio
FMA: Fosfato monoamónico
SFS: Súper fosfato simple

Recomendaciones

Para evitar problemas de fitotoxicidad se deberán tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Uso de sembradoras fertilizadoras que no depositen la semilla y el fertilizante en la misma línea de siembra (Figura 1).
- Usar dosis muy bajas de N especialmente como urea.
- Poner mayor atención en suelos de textura gruesa, secos en superficie y principalmente en el cultivo de girasol.
- Priorizar distancias entre hileras menores 0.70 m en cultivos de verano.

Bibliografía

• Alvarez C.R., M. Tourn, H. Rimski Korsakov y P. Prystupa. 2007. Máquinas para la aplicación de fertilizantes, enmiendas e inoculantes. In: Tecnología de la fertilización de cultivos extensivos en la Región Pampeana. Ed: P Prustupa. Pag. 33-53.

• Ciampitti I. A., F. G. Micucci, H. Fontanetto y F. O. García. 2006. Manejo y ubicación del fertilizante junto a la semilla: Efectos Fitotóxicos.

• Dowling C.W. 1993. Tolerance of ten crop species to atmospheric ammonia during seed germination, radicle and coleoptile growth. (Ed. NJ Barrow) Plant nutrition - from genetic engineering to field practice: Proceedings of the Twelfth International Plant Nutrition Colloquium, 21-26 September 1993, Perth, Western Australia. pp. 541-544.

• Echeverría H. E., F. O. García. 2006. Fertilidad de suelos y Fertilización de cultivos.

• Mortvedt J., L. Murphy y R. Follet. 1999. Fertizer technology and application. Meister Pub. Co. Willoughby, Ohio. USA.

• Pelayo M. 2010. Fitotoxicidad de los fertilizantes aplicados en la línea de siembra en la Región Semiárida Pampeana. Trabajo Final de Intensificación. Facultad de Agronomía UBA. Proyecto Fertilizar-INTA. 2002. Fertilizantes, enmiendas y productos nutricionales. Guía 2002.

• Prystupa P. 2007. Tecnología de la fertilización de cultivos extensivos en la Región Pampeana, Editorial Facultad de Agronomía.

• Ventimiglia L. A., H. G. Carta. 2005. Soja: Efecto de los fertilizantes aplicados en la línea de siembra sobre el número de plantas y el rendimiento.

Alfredo Bono, Alberto Quiroga, Pamela Azcarate y Nanci Kloster

Muestreo e interpretación de análisis de suelos

El objetivo de este capítulo es realizar una correcta toma de muestra e interpretación de los resultados de análisis de suelo, además de mostrar situaciones reales de campo. Conocer la fertilidad o propiedades físicas y químicas del suelo en cada lote permite planificar el manejo de su campo y corregir deficiencias nutricionales a través de fertilizaciones, con el objeto de optimizar los rendimientos.

¿Para qué realizar una evaluación de suelos?

- Definir la estrategia de fertilización de un cultivo.
- Controlar las variaciones de las propiedades físicas y químicas del suelo en el tiempo.
- Caracterizar un lote, por ejemplo para decidir la compra de un campo.
- Evaluar los efectos de distintas secuencias de cultivo.
- Evaluar problemáticas específicas: acidez, alcalinidad, sodicidad, toxicidad.

Como tomar una muestra de suelo

Al tomar correctamente la muestra de suelo se evitan los errores asociados a la variabilidad del lote. Para ello, se requiere preparar una muestra compuesta de 10 a 15 submuestras extraídas de partes homogéneas del lote. Si el lote presenta un relieve irregular, realizar el muestreo en el sector de loma (M1), media loma (M2) y bajo (M3) (Figura 1), resultando de ello tres muestras compuestas. Dada la heterogeneidad del suelo, aún en lotes de relieve muy uniforme pueden observarse valores variables de algunos nutrientes. Esto se ve más acentuado en el contenido fósforo (P), más adelante en éste capítulo se discutirá este problema.

En todos los casos el muestreo debe realizarse a una distancia aproximada de 50-60 metros de alambrados, aguadas y árboles. Teniendo en cuenta que el horizonte A puede ser de distinto espesor, se recomienda tomar muestras siempre a la misma profundidad, por ejemplo de 0 a 20 cm, para comparar los datos a lo largo del tiempo.

Cuando tomar la muestra de suelo

Esto dependerá de la situación en que nos encontremos. Si se desea:

- **detectar problemas:** el muestreo puede realizarse en cualquier momento. Es recomendable planificar la extracción de muestras y no esperar el momento previo a las siembras.
- **para fertilizar:** el momento de muestreo depende del nutriente a considerar. Por ejemplo, para determinación de nitratos, 15 días antes de la siembra o al macollaje en el caso del trigo.

Que parámetros edáficos debemos evaluar

En la Tabla 1 se detallan los parámetros a evaluar. Se dividen en estables, moderadamente estables y dinámicos.

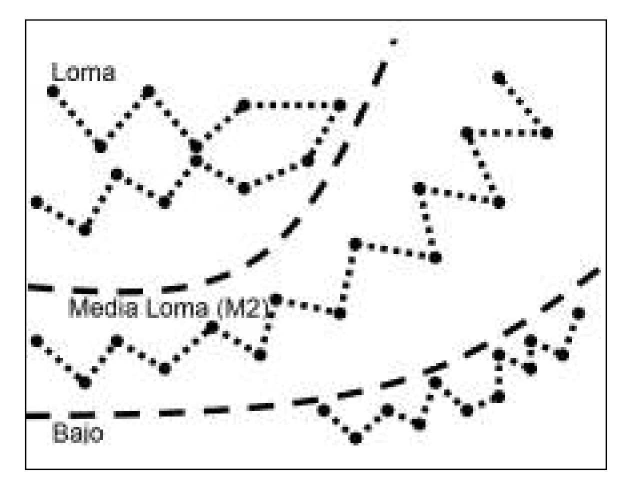


Figura 1. Esquema para la toma de muestras compuestas en un lote con diferentes relieves.

Tabla 1. Parámetros edáficos necesarios para evaluar el estado de un lote.

Parámetros edáficos a evaluar		
Estables	**Moderadamente estables**	**Dinámicos**
Textura	Carbono Orgánico	Nitratos
Profundidad	Nitrógeno total	Sulfatos
Capacidad de retención de agua	Fósforo asimilable	contenido de agua útil
Capacidad de intercambio catiónico	pH	resistencia a la compactación
	Saturación de Bases	
	Cationes intercambiables	
	Conductividad Eléctrica	
	Estabilidad Estructural	
	Susceptibilidad a la compactación	

Tabla 2. Algunas consideraciones sobre la evaluación de propiedades edáficas.

Determinación	Momento de muestreo	Frecuencia	Profundidad de muestro (cm)
Nitrógeno de Nitratos ($N-NO_3$)	Previo a la siembra de los cultivos y/o en el momento decidir fertilizar	Cada vez que se realiza un cultivo	0-20, 20-40 y 40-60
Nitrógeno orgánico (No) Carbono orgánico (CO)/ Materia orgánica (MO) Fósforo asimilable (P) pH (actual y potencial) Conductividad eléctrica (CE) Cationes intercambiables y saturación de bases	En cualquier época del año, preferentemente elegir los mismos meses del año	Cada dos años dependiendo del manejo u origen del problema.	0-20 CE preferentemente en capas de 20 cm hasta la tosca o napa
Textura	En cualquier época del año.	Una sola vez	0-20
Capacidad de Intercambio catiónico	En cualquier época del año.	Cada 5 años	0-20
Humedad (Agua útil)	Previo a la siembra de los cultivos y/o en el momento decidir fertilizar	Cada vez que se realiza un cultivo	En capas de 20 cm hasta la tosca o napa freática

Los momentos y profundidad de muestreo y frecuencia recomendados para cada determinación de suelo a realizar se detallan en la Tabla 2.

Como interpretar los resultados

Nitrógeno de Nitratos: Es una de las formas de captación de nitrógeno más importantes para las plantas. El contenido de éste parámetro en los suelos es variable y depende de varios factores como temperatura, humedad del suelo, estado vegetativo del cultivo y manejo del suelo entre otros. Por ello, es importante saber cuándo y para qué queremos conocer el nivel de nitratos del suelo. En general, los resultados informados por el Laboratorio expresan los valores de $N-NO_3$ en partes por millón (ppm). En la mayoría los casos, ésta determinación se realiza antes o a la siembra de un cultivo, para establecer el nivel disponible después de un barbecho, que varía de acuerdo al manejo y a los distintos antecesores. Es útil también en siembra directa (SD) para hacer ajustes por medio de fertilizantes. En líneas generales, valores de $N-NO_3$ menores a 4 ppm en la capa superficial del suelo (0 a 20 cm) son considerados bajos y se recomienda fertilizar.

Muchos métodos de diagnóstico y recomendación para distintos cultivos usan kg ha^{-1} de N-NO3 en el estrato 0-60 cm de profundidad para estimar los requerimientos de fertilizante. Sin embargo, en la práctica el muestreo hasta esa profundidad no suele realizarse por limitaciones de tiempo y esfuerzo a utilizar. En un trabajo de Bono y Álvarez (2006) se midió el contenido de N-NO3 en capas de 20 cm hasta los 60 cm, a la siembra y en forma postergada en ensayos de fertilización en los cultivos de trigo y girasol en Molisoles y Entisoles de la Región Semiárida Pampeana (RSP). Se usaron dos sistemas de labranza, labranza convencional (LC) de la zona (rastras y discos) y SD en los distintos ensayos. Se utilizaron distintos antecesores, longitudes de barbecho, cultivares y fecha de siembra para cada cultivo. De las 404 determinaciones el 87 % de las mismas corresponden a un rango de valores de 0 a 40 kg ha^{-1} de N-NO3 en los primeros 20 cm del suelo (Figura 2).

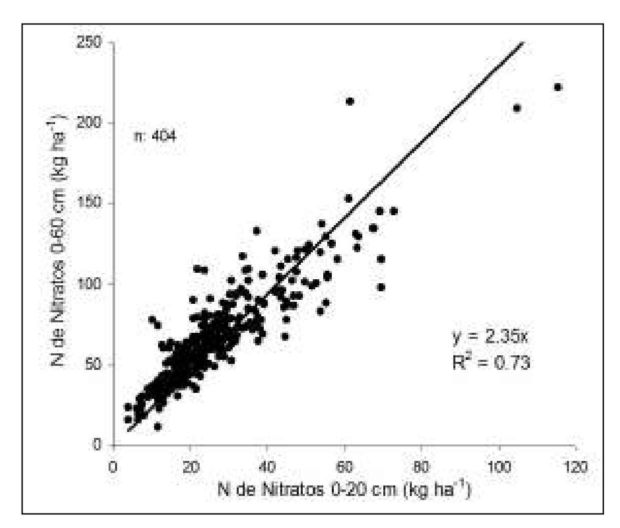


Figura 2. Contenido de N-NO3 en 0-20 cm y 0-60 cm de profundidad de suelo incluyendo la totalidad de las muestras analizadas (n = 404).

El contenido de N-NO3 es en promedio 2.4 veces mayor en el estrato de 0-60 cm que en el de 0-20 cm. El modelo ajustado puede usarse como una herramienta en la estimación del contenido de N disponible en profundidad de los suelos de está región, contando solo con el dato de N-NO3 de 0 a 20 cm.

Nitrógeno orgánico: Si los valores se expresan en % de suelo seco, por ejemplo 0,09 %, significa que por cada 100 kg de suelo seco hay 90 g de nitrógeno orgánico. Tanto para nitrógeno orgánico como para MO los niveles están muy relacionados con la textura. Suelos con textura gruesa (arenosos) tienen menores valores para ambas características. De todos modos, hay un rango de valores que nos permiten orientar sobre la fertilidad de los suelos. Si consideramos los primeros 20 cm de suelo (capa arable):

	E de La Pampa	**O de Buenos Aires**
Valores bajos	0,04 % a 0,07 %	0,06 % a 0,08 %
Valores medios	0,08 % a 0,10 %	0,09 % a 0,11 %
Valores medios a altos	0,11 % a 0,12 %	0,12 % a 0,14 %
Valores altos	más de 0,13%	más de 0,15%

El valor de nitrógeno orgánico puede estimarse sabiendo el contenido de materia orgánica. Esto se desarrollará en el Capítulo “Manejo de unidades”.

Carbono Orgánico y Materia Orgánica: La determinación de Co es una medida del contenido de C humificado del suelo. Para convertirlo en MO (%), es necesario aplicar un coeficiente. Esto se encuentra desarrollado en el próximo capítulo “Manejo de unidades”. Los valores considerados altos ó bajos cambian de acuerdo a la zona, lo cual se ejemplifica en la Tabla 3.

pH: El rango óptimo de pH para el desarrollo de los cultivos es de 6,5 a 7,5. En la RSP podemos encontrar en general estos valores. Sin embargo, por procesos de acidificación o alcalinización, pueden observarse suelos con valores de 5 a 5,5 o de 8 a 8,8 de pH en la capa superficial.

Conductividad eléctrica: la CE de un suelo es proporcional al número de iones presentes y a su movilidad, por lo que permite estimar el contenido de

Valor	E de La Pampa		O de Buenos Aires	
	C_o (mg g^{-1})	MO (%)	C_o (mg g^{-1})	MO (%)
Bajo	< 5,8	< 1,0	No apto para uso agrícola	
Medio	5,8 – 8,7	1,0 – 1,5	5,8 – 11,6	1,0 – 2,0
Medio - Alto	8,7 – 11,6	1,5 – 2,0	11,6 – 20,3	2,0 – 3,5
Alto	> 11,6	> 2,0	> 20,3	> 3,5

Tabla 3. Valores de C_o típicos en suelos del este de La Pampa y oeste de Buenos Aires.

Tabla 4. Rangos de salinidad adecuados para el cultivo de diferentes especies.

Conductividad eléctrica a 25 °C del extracto de saturación	Efectos producidos	Ejemplos plantas que pueden cultivarse
0 a 2 mmho cm^{-1} o dS m^{-1}	Prácticamente no existen especies que acusen efectos de salinidad	Todas las especies vegetales
2 a 4 mmho cm^{-1} o dS m^{-1}	Los cultivos muy sensibles pueden verse afectados	Trébol rojo, Trébol blanco, Pimpinela, poroto, apio
4 a 8 mmho cm^{-1} o dS m^{-1}	Muchos cultivos pueden verse afectados	Maíz, Girasol, Trigo, Avena, Centeno, Tréboles de olor
8 a 16 mmho cm^{-1} o dS m^{-1}	Los cultivos que prosperan son muy escasos	Agropiro alargado, Grama rhodes, cebada
Más de 16 mmho cm^{-1} o dS m^{-1}	Prácticamente no hay cultivos que puedan prosperar	Aquí no entraría ninguno de los vegetales cultivados.

Tabla 5. Valores de fósforo en suelo hallados en bibliografía internacional .

Valor	Fósforo (ppm)
Bajo	< 12
Medio	12 – 20
Alto	> 20

sales que contiene. Sus valores son orientativos y deben complementarse con determinaciones de profundidad de la napa freática, sistemas de labranza, etc. La determinación se realiza normalmente en extracto de saturación a 25ºC y se expresa como dS m^{-1} (deci-Siemens por metro), unidad que reemplaza a mmho cm^{-1}, utilizada históricamente. A continuación se indican los rangos de salinidad adecuados para el desarrollo de diferentes especies (Tabla 4).

Fósforo asimilable: Cuando los resultados de laboratorio son expresados en ppm esto indica los mg de P asimilable por Kg de suelo seco. Los rangos de contenido de P asimilable para detectar deficiencias en las plantas, se indican en la tabla 5. Estos rangos son recomendados por bibliografía internacional, aunque para la RSP valores por debajo de 15 ppm son considerados bajos y debería plantearse una fertilización fosforada.

Sin embargo, el valor umbral de P para obtener el rendimiento máximo puede variar considerablemente en los distintos cultivos tal como muestra la Figura 3.

En zonas con problemas de P asimilable como las que se muestran en la Figura 4, Capítulo X, es conveniente realizar un muestreo reticulado para detectar diferentes niveles de fertilidad. El uso de fertilizantes en dosis variables reduce la heterogeneidad del lote. Posteriormente, logradо un grado de uniformidad aceptable, pueden usarse muestras compuestas para seguir la variación en el tiempo de la fertilidad fosforada.

Variabilidad espacial y estratificación de los niveles de P asimilable: La variabilidad que presenta el P en un lote de producción puede ser muy importante, abarcando rangos que van desde la deficiencia del nutriente hasta niveles de muy buena disponibilidad. A causa de esto la toma de una muestra de suelo representativa de un lote es un aspecto fundamental cómo parte del diagnostico y recomendación de la fertilización. El esquema de toma de muestras lo podríamos dividir en dos grandes grupos en relación a la complejidad operativa, tipo de información

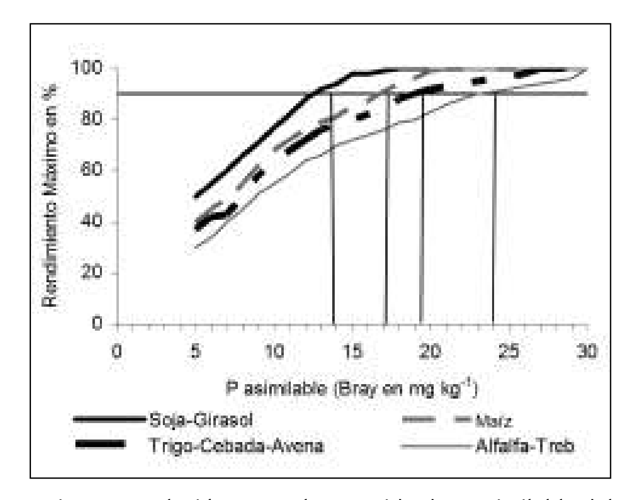
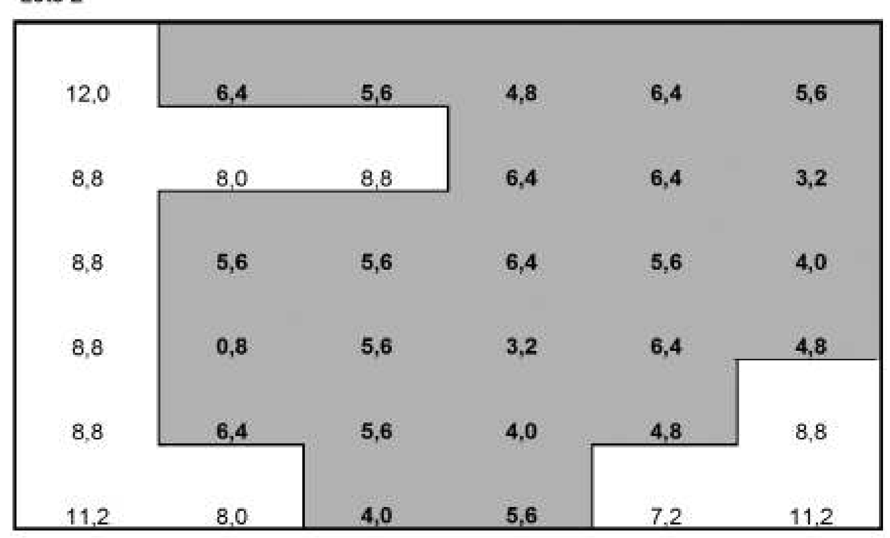


Figura 3. Relación entre el contenido de P asimilable del suelo (Bray Kurtz 1) y los rendimientos relativos de los cultivos, adaptados para la Región Pampeana Argentina (García et al. 2005).

Lote 1

17,6	44,0	24,0	8,0	8,8	5,6
8,8	30,4	36,0	10,4	1,6	5,6
7,2	42,4	36,0	4,0	7,6	6,4
4,8	36,8	44,8	8,8	4,0	6,4
4,0	39,2	40,8	8,8	7,2	4,0
2,4	15,2	42,8	12,8	7,2	7,2

Lote 2



12,0	6,4	5,6	4,8	6,4	5,6
8,8	8,0	8,8	6,4	6,4	3,2
8,8	5,6	5,6	6,4	5,6	4,0
8,8	0,8	5,6	3,2	6,4	4,8
8,8	6,4	5,6	4,0	4,8	8,8
11,2	8,0	4,0	5,6	7,2	11,2

Figura 4. Distribución espacial de los niveles de fósforo asimilable. Muestreo reticulado en campos de productores. Adaptado de Fagioli y Bono (1984).

y costos (Alesso y Pilatti 2008). Un grupo se basa en la toma de submuestras al azar para obtener una muestra compuesta representativa del lote a bajo costo. En el lado opuesto estaría un sistema de muestreo intensivo en grillas, que si bien es de mucho mayor costo nos permite realizar un sistema de manejo de P sitio específico.

En dos lotes de productores en labranza convencional, se realizo un muestreo reticulado distanciado 80 x 60 m aproximadamente. En cada punto se extrajo una muestra compuesta de cinco submuestras a la profundidad de 0-15 cm, en una superficie de 1 m2 (Fagioli y Bono 1984) (Figura 4). En el lote 1, puede observarse una distribución variable de los niveles de P asimilable entre la parte central (40 % de la superficie, con un rango de 10,4 a 44,8 ppm) y las laterales (60 % de la superficie, y un rango de 1,6 a 8,8 ppm). En el lote 2, también se observan dos zonas, pero con niveles más bajos, 0.8 a 6.4 ppm y 7 a 12 ppm. En el primer lote hay un 40 % de la superficie que no requiere fertilización fosforada, mientras que deberían realizarse dosis variables en el 60 % restante y en el lote 2.

En otros casos, en dos lotes de producción bajo SD en el año 2008 se instalaron dos ensayos de trigo en la localidad de Maisonave, La Pampa. En cada lote se realizó una muestra compuesta para caracterizar el nivel de P y además se realizó el muestreo reticulado por parcela a dos profundidades, 0-5 y 5-20 cm. La variación espacial encontrada en los niveles de P asimilable fue muy significativa en los dos sitios. La variación en los niveles de P a 0-5 cm fue de 5 a 25 ppm y de 5-20 cm de 5 a 15 ppm en un sitio y en el otro de 8 a 38 ppm para los primeros 5 cm y 5 a 30 ppm de 5-20 cm. Además, se presentó una importante estratificación de P en los primeros 5 cm del suelo, principalmente en el sitio que posee mayor nivel de P asimilable en los 20 cm de profundidad (Figura 5).

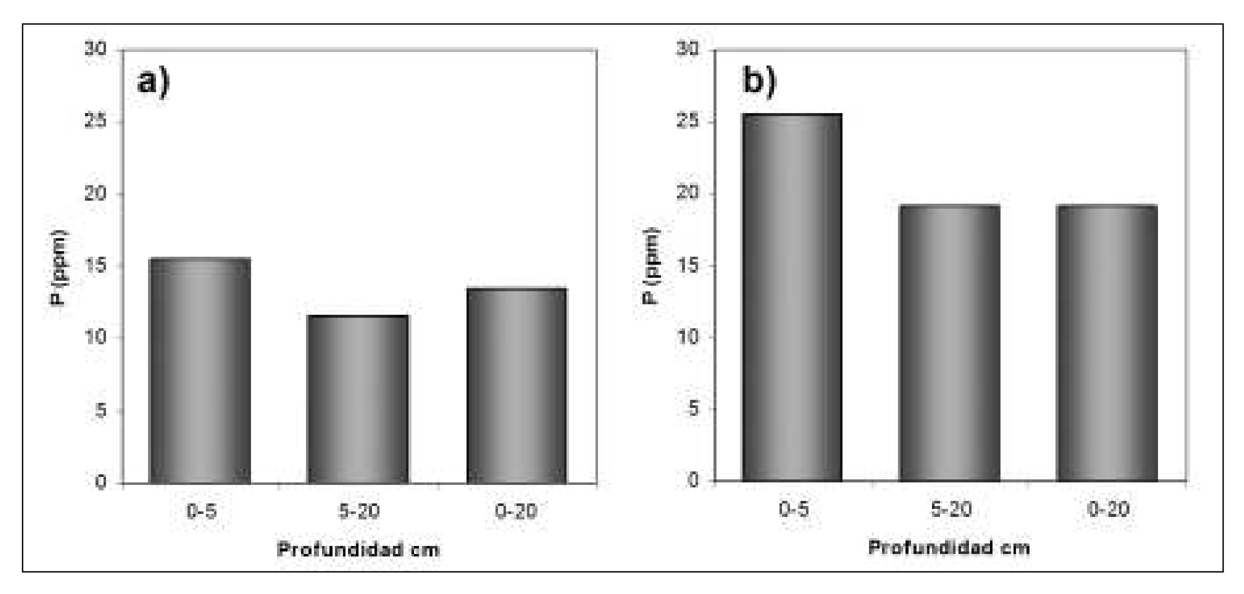


Figura 5. Contenidos promedios de P asimilable a 0-5, 5-20 y 20 cm de profundidad en los dos sitios de estudio en la localidad de Maisonave.

Teniendo en cuenta los esquemas de muestreo antes mencionados, si utilizaríamos una sola muestra compuesta para caracterizar el nivel de P se generarían zonas de subfertilización (negativas) y zonas de sobrefertilzación (positivas). Por lo tanto, la eficiencia de la práctica de fertilización sería muy baja. La agricultura de precisión y el manejo sitio especifico proveen una oportunidad para mejorar el manejo de P en la agricultura. Esta tecnología hoy es factible de realizar gracias a la combinación de un amplio espectro de tecnologías tales cómo los sistemas de posicionamiento global, la tecnología de aplicación variable y los sistemas de información geográfica. Estos nos permiten obtener una identificación más precisa de los niveles de nutrientes en el suelo y ajustar las dosis de fertilizantes dentro del lote.

La gran adopción de sistemas de SD y labranzas conservacionistas ha producido un cambio en la dinámica de acumulación de los nutrientes, especialmente de P (Selles 2003). Se presentan principalmente cambios en la proporción de las formas dominantes de P, principalmente P orgánico, el cual va a estar más fácilmente biodisponible para el cultivo. A causa de este fenómeno de estratificación de P, se están debatiendo si las profundidades de muestreo habitualmente utilizadas para el diagnostico de la fertilización de P son las correctas. De todas maneras, cómo hasta el momento las técnicas para el diagnostico de P se basan en P inorgánico, y además la profundidades de muestreo utilizadas (en general 20 cm) no coinciden con la acumulación de esas fuentes de P orgánico, no tendría sentido modificar la profundidad de muestreo.

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y cationes intercambiables: Como se mencionó en el capítulo I, la CIC es una medida de la cantidad de cationes intercambiables que neutralizan la carga negativa del suelo. Es una propiedad que varía en los suelos de acuerdo a la proporción de coloides y mineralogía, lo cual determina su superficie específica capaz de adsorber cationes. En suelos arenoso franco de la RSP la CIC alcanza valores tan bajos como 5 cmolc kg^{-1}, mientras que en suelos francos puede superar los 15 $cmol_C$ kg^{-1}.

Los Cationes intercambiables son aquellos adsorbidos a las partículas de suelo, y su cuantificación implica la determinación de calcio, magnesio, sodio y potasio. Los informes de laboratorio frecuentemente indican el porcentaje de saturación de bases (% SB) que es la relación de los cationes intercambiables a la CIC del suelo. Un % SB de 80 % significa que el 80 % de la CIC está ocupada por cationes intercambiables (calcio, magnesio, sodio y potasio) y un 20 % por otros iones tales como hidrógeno y aluminio. En la Tabla 6 se indican los valores de CIC, cationes intercambiables y %SB para dos suelos de la RSP.

Tabla 6. Ejemplo de CIC y cationes intercambiables para dos suelos de la RSP.

Parámetro (cmolc kg^{-1})	Valor (cmolc kg^{-1})	
	Suelo franco	Suelo franco arenoso
CIC	19.0	13.2
Calcio	8.4	8.4
Magnesio	3.0	2.0
Sodio	0.1	0.4
Potasio	1.3	1.3
SB	67.2 %	91.6 %

Índice MO/(limo + arcilla): A pesar de lo mucho que se ha estudiado el impacto de la MO sobre la productividad de los suelos no se han podido establecer puntos críticos a partir de los cuales se verían afectados los cultivos y pocos trabajos describen relaciones entre la cantidad de MO de los suelos y los rendimientos (Álvarez 2005). En los últimos años se ha reemplazado el valor de MO para evaluar la productividad de los cultivos, por indicadores de la calidad de los suelos, como por ejemplo: MO en relación a la textura. Estudios recientes están mostrando que la relación entre la MO y la textura es un buen indicador de la calidad de los suelos. Este índice aparece como un indicador promisorio del rendimiento, más aún cuando el mismo puede ser determinado previo a la siembra como por ejemplo en los cultivos de girasol y cebada (Figura 6 y 7) (Quiroga et al. 2002; Quiroga et al. 2006).

Este índice tiene un rango de valores de 2 a 12 aproximadamente, por debajo de 4,5 a 5 los valores son considerados bajos y por arriba altos. Un índice bajo indicaría que el suelo a perdido MO en relación al limo + arcilla que tiene, por lo tanto ese suelo tendría poca MO joven, lábil o fácilmente mineralizable. En contraposición, un suelo con un índice alto tendría un contenido de MO alto en relación al limo + arcilla que posee.

Análisis de casos reales. Interpretación

Las siguientes situaciones son casos reales de muestreos de suelo a 0-20 cm, previos a la realización de cultivos de cosecha. Se considera para cada caso dos momentos de muestreo, en mayo previo a la siembra de trigo y en agosto previo a la siembra de cultivos de cosecha gruesa.

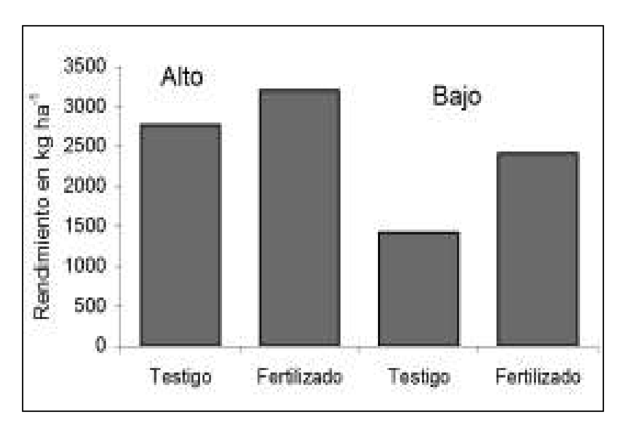


Figura 7. Rendimiento promedio de girasol de lotes comparativamente con alto y bajo índice de MO/arcilla + limo. (Quiroga et al. 2002).

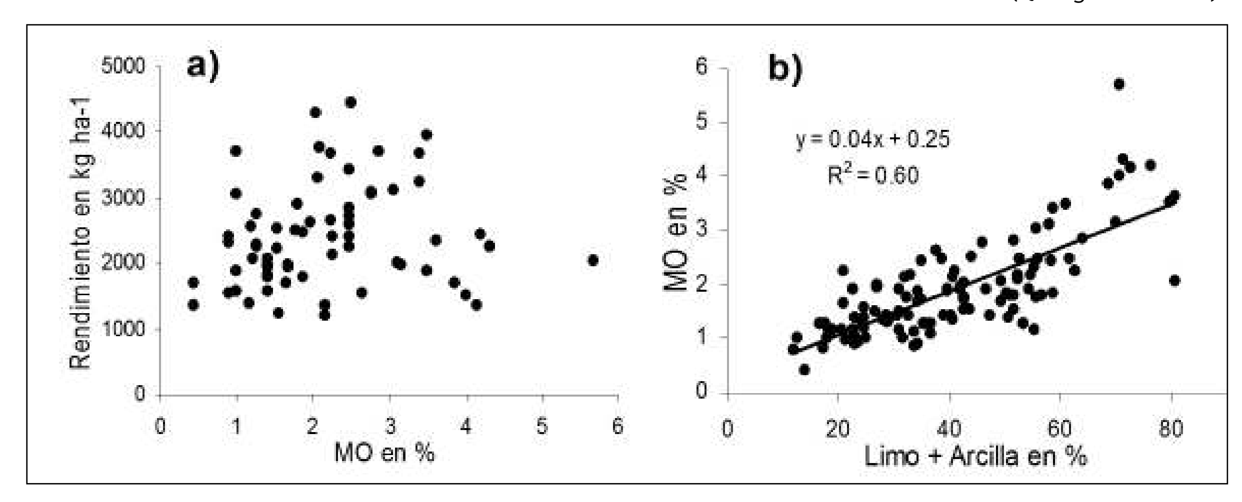
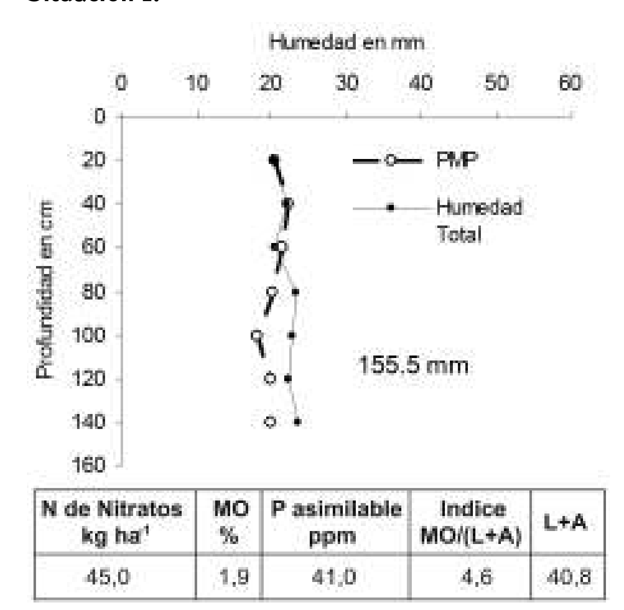


Figura 6. a) Relación entre el rendimiento en girasol y la MO y b) los mismos valores de MO relacionados con el limo + arcilla.

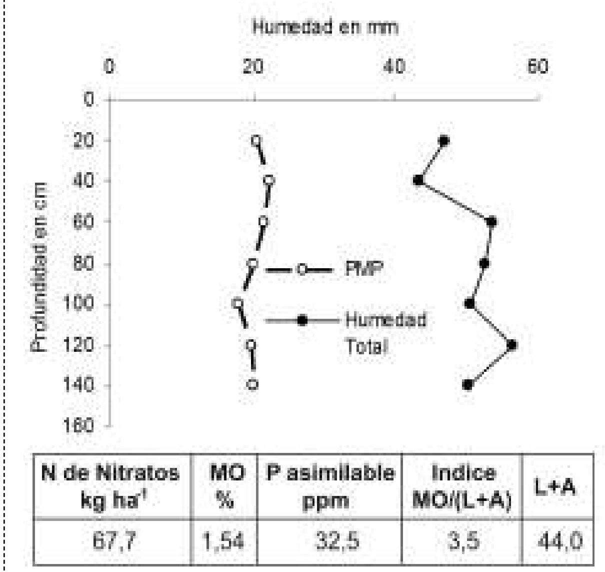
Situación 1:



N de Nitratos kg ha⁻¹	MO %	P asimilable ppm	Indice MO/(L+A)	L+A
45,0	1,9	41,0	4,6	40,8

No hay agua útil en todo el perfil, mientras los niveles de N de nitratos, P asimilable e índice son buenos. El mayor problema en este caso es la falta de agua, con lo cual es necesario recargar el perfil para poder sembrar, de lo contrario dependemos totalmente de las lluvias. Según los suelos de esta región el agua útil puede variar aproximadamente de 80 a 150 mm, con lo cual recargar el perfil lleva un cierto tiempo y sería necesaria más de una lluvia. Si el muestreo es en mayo las probabilidades son muy bajas y habría que pensar en cultivos de verano. Mientras que si el muestreo es en agosto con lluvias, abundantes y tempranas se pueden iniciar siembras de maíz, girasol y si las mismas se retrasan o no son abundantes está la posibilidad de sembrar soja o maíces tardíos en noviembre, diciembre.

Situación 3:



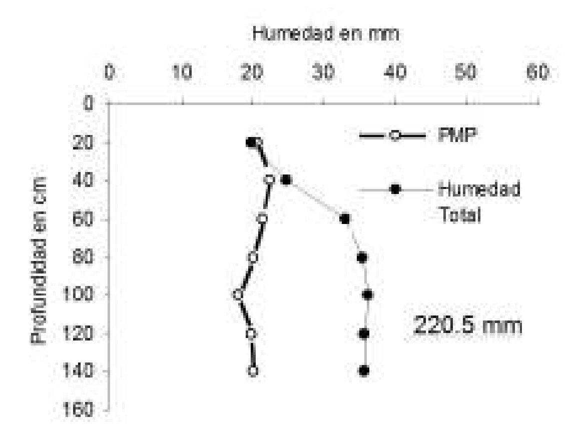
N de Nitratos kg ha⁻¹	MO %	P asimilable ppm	Indice MO/(L+A)	L+A
67,7	1,54	32,5	3,5	44,0

El suelo está en su máxima capacidad de retención de agua, el nivel P es alto y si bien tiene un buen nivel de N de nitratos tiene un índice bajo. Esto último nos podría indicar que durante el ciclo del cultivo (invierno o verano) se libere poco N al suelo. Este sería un caso de posible fertilización postergada, tanto en macollaje o 2 a 4 pares de hojas en cultivos de verano, ver el estado de los mismos, número de plantas, color, estado sanitario, control de malezas etc. y tomar la decisión de fertilizar.

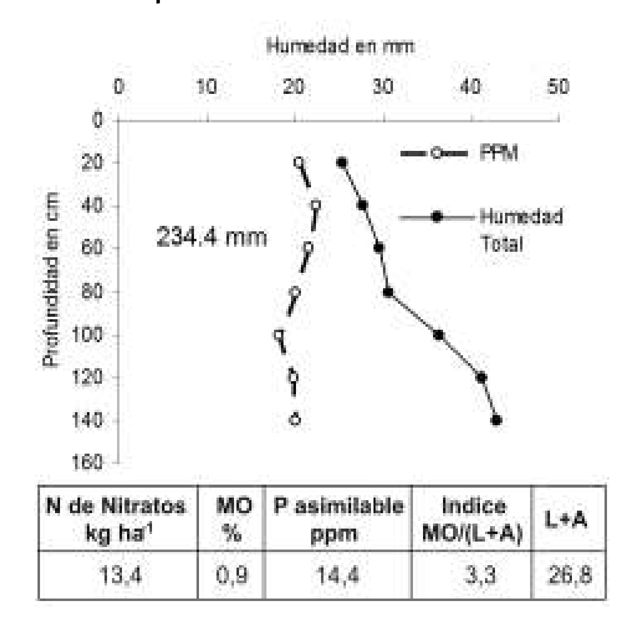
Situación 2:

El suelo está seco en los primeros 20 a 40 cm de suelo, los niveles de N de nitratos, P asimilable e índice son buenos. En este caso solo necesitaríamos de una lluvia para sembrar tanto en mayo como en agosto.

N de Nitratos kg ha⁻¹	MO %	P asimilable ppm	Indice MO/(L+A)	L+A
34,7	1,7	62,2	4,7	36,8



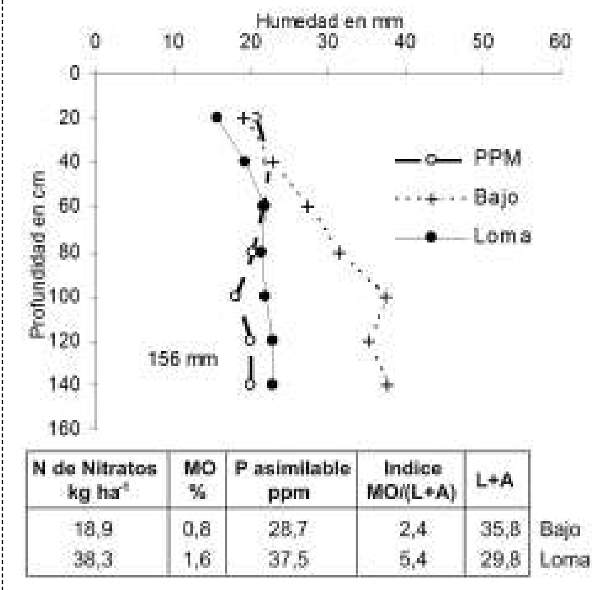
Situación 4:



N de Nitratos kg ha-1	MO %	P asimilable ppm	Indice MO/(L+A)	L+A
13,4	0,9	14,4	3,3	26,8

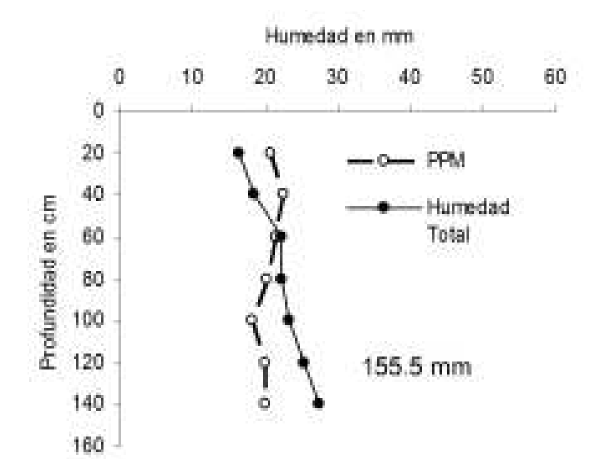
En contenido de agua útil es bueno solo falta completar unos mm en los primeros cm del perfil. Desde el punto de vista hídrico se puede sembrar, pero tiene bajos contenidos de N de nitratos, P e índice. Se debería pensar en una corrección de de fertilidad nitrogenada y fosforada.

Situación 5:



N de Nitratos kg ha-1	MO %	P asimilable ppm	Indice MO/(L+A)	L+A	
18,9	0,8	28,7	2,4	35,8	Bajo
38,3	1,6	37,5	5,4	29,8	Loma

El mismo lote tiene dos situaciones diferentes, loma y bajo. Los niveles de fertilidad en este caso son más altos en la loma, pero el bajo tiene muy buen contenido de humedad, en especial después de los 60 cm de profundidad. En estas situaciones se deberá realizar un manejo diferente. Es decir, pensar en este lote como si fueran distintos, en el bajo reforzar la fertilidad y aprovechar el contenido de agua en especial en profundidad, con posibilidad de napa cerca. En las lomas, esperar lluvias que carguen el perfil y buscar mejorar la captación y eficiencia del agua a través de cobertura, SD.

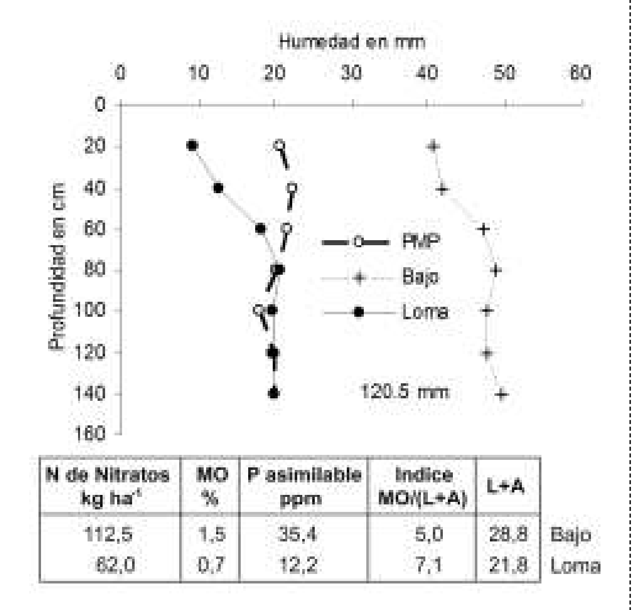


Situación 6:

Hay muy poca agua en el perfil, y el nivel de fertilidad es muy bueno. Es similar a la situación 1, en este caso (6) hay un poco más de humedad en el suelo y los niveles de fertilidad son más altos. De todos se necesitan lluvias para recargar el perfil, si estamos en mayo junio, las siembras de cultivos de verano tendrían mayores posibilidades.

N de Nitratos kg ha-1	MO %	P asimilable ppm	Indice MO/(L+A)	L+A
123,3	2,0	21,9	7,5	22,2

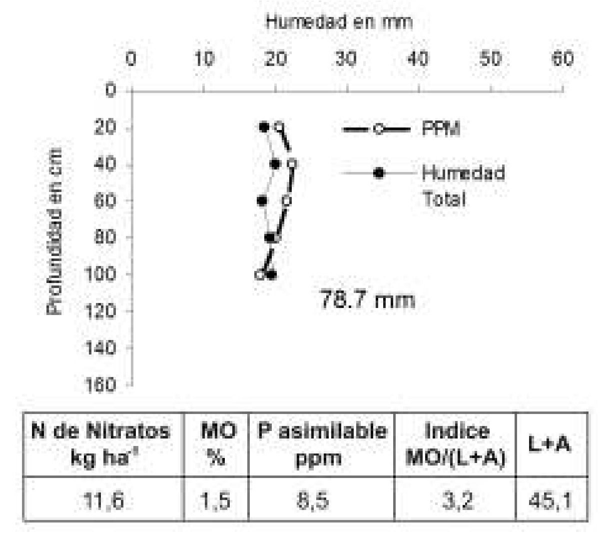
Situación 7:



N de Nitratos kg ha-1	MO %	P asimilable ppm	Indice MO/(L+A)	L+A	
112,5	1,5	35,4	5,0	28,8	Bajo
62,0	0,7	12,2	7,1	21,8	Loma

Es una situación similar a la 5 con la diferencia que los bajos son muy buenos en el contenido de humedad en el suelo y desde el punto de fertilidad nitrogenada y fosforada. En estos se pueden presentar varias alternativas desde no sembrar y dejar como campo natural o pasturas perennes a la loma o sembrarla con menor aplicación de tecnología.

Situación 8:



N de Nitratos kg ha-1	MO %	P asimilable ppm	Indice MO/(L+A)	L+A
11,6	1,5	8,5	3,2	45,1

Suelo totalmente seco, tosca a 100 cm y niveles de fertilidad muy bajos. Esta es una situación donde antes de programar una siembra o una fertilización debemos mejorar las condiciones de suelo, mayor captación de agua, residuos, SD, pasturas con base a leguminosas etc.

Bibliografía

• Alesso C. A. y M. A. Pilatti. 2008. Variabilidad espacial de la densidad del suelo, fósforo extractable y potasio intercambiable. (Cd room) Actas del XXI Congreso de la Asociación Argentina de Ciencia de Suelo (AACS). Potrero de los Funes, San Luis.

• Álvarez R. 2005. Balance de carbono en suelos de la pampa ondulada: Efecto de la rotación de cultivos y la fertilización nitrogenada. Simposio "FERTILIDAD 2005" nutrición, Producción y ambiente. INPOFOS. p61-70.

• Bono A. y R. Álvarez. 2007. Estimación de nitratos en profundidad en suelos de la región semiárida y subhúmeda pampeana. INFORMACIONES AGRONOMICAS DEL CONO SUR Nº 35. pp 1-5.

• Fagioli M. y A. Bono. 1984. Disponibilidad de fósforo asimilable y métodos de muestreo del suelo, en las regiones semiárida y subhúmeda pampeanas, Publicación Técnica Nº 31. EEA Anguil.INTA,

• García F., L. Picone y A. Berardo. 2005. Fósforo. pag. 99-121. In: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Ed: H Echeverría y F García. INPOFOS INTA.

• Quiroga A., A. Bono y A. Corro Molas. 2002. Aspectos nutricionales del girasol en la región semiárida y subhúmeda pampeana. pp 128-134. In: IDIA XXI Oleaginosas.

• Quiroga A., D. Funaro, E. Noellemeyer y N. Peinemann. 2006. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. Soil & Tillage Research. 90:63-68.

• Selles F. 2003. Influencia de la siembra directa en la dinámica del fósforo en el suelo. Simposio "El Fósforo en la Agricultura Argentina". INPOFOS Cono sur, pp 12-19.

Pamela Azcarate, Nanci Kloster, Alberto Quiroga y Alfredo Bono

Manejo de unidades

Cuando recibimos los análisis de las muestras de suelo enviadas al laboratorio, no siempre nos encontramos con las unidades que estamos acostumbrados a utilizar. Tanto las metodologías como las formas de expresar los resultados cambian. En éste momento en nuestro país se encuentran en discusión, las metodologías vinculadas a la Calidad de Suelos a través del Comité IRAM-SAGPyA, y se está utilizando el Sistema Internacional de Unidades (SI) para la expresión de los resultados. La realidad demuestra que estamos habituados a la utilización de diferentes unidades para realizar estimaciones de rendimiento que no siempre coinciden con las utilizadas por el SI. En éste capítulo intentaremos proporcionar las herramientas necesarias para que pueda realizar las transformaciones y el cambio de escala (muestra de laboratorio-lote) con el objeto de realizar un correcto análisis e interpretación de los datos.

1. Unidades. Manejo de Unidades

El Sistema Internacional de Unidades, cuenta con unidades básicas que se detallan en la Tabla 1.

Las unidades que habitualmente encontramos en los resultados de muestras de suelos dependen mucho si la metodología utilizada está normalizada o no. En general las metodologías que se encuentran normalizadas expresan sus resultados en unidades del SI, mientras que las que no están normalizadas pueden utilizar éstas unidades u otras (Tabla 2).

Dentro de las metodologías que se han normalizado en el Comité IRAM- SAGPyA para Calidad de Suelos, están las determinaciones de fósforo y Carbono orgánico (IRAM-SAGPyA 29571-2), donde las unidades de los resultados son las del SI (Tabla 3)

Para fósforo (P), estamos acostumbrados a utilizar los resultados en ppm, y materia orgánica (MO) en porcentaje (%). Teniendo en cuenta esto, haremos el pasaje de unidades a las unidades a las que usamos frecuentemente. En la Figura 1, se encuentran los resultados de los análisis enviados por el laboratorio de una muestra de suelo.

El resultado de la determinación de P está expresado en ppm por lo que no deberíamos realizar el pasaje de unidades, tiene una concentración de 10 ppm = 10 mg kg^{-1}
¿Y si el resultado se hubiese expresado en μg g^{-1} como la norma lo especifica? es decir que el resultado de la concentración de P sería 10 μg g^{-1} . Para

Tabla 1. Algunas unidades SI básicas.

Cantidad fundamental	Nombre de la unidad	Símbolo
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Temperatura	Kelvin	K
Cantidad de sustancia	mol	mol

Tabla 3. Metodologías normalizadas: expresión de las unidades.

Determinación	Unidades
Fósforo (P)	μg g^{-1}
Carbono Orgánico (CO)	mg g^{-1}

Medida	Unidad
Concentración	ppm = mg kg^{-1} = mg g^{-1} * 1000 = (kg 100 kg^{-1}) * 10
Longitud	m
Densidad	Kg m^{3-1}

Tabla 2. Unidades utilizadas en los resultados de análisis de suelo.

expresarlo en ppm no debemos multiplicarlo por ningún factor, dado que al pasar los μg de P a mg de P y los g de suelo a kg de suelo el resultado final es el mismo, es decir:

$$10\ \mu g\ g^{-1} = 10\ mg\ kg^{-1} = 10\ ppm$$

En el informe del laboratorio nos muestra el contenido de CO (mg g^{-1}) así como el de MO (en %). Supongamos que no se nos informó el dato de MO y solo recibimos el resultado de CO. Los pasos a seguir para convertir los datos de CO a MO son:

a) pasar los mg de CO a g
b) multiplicar por el factor de Van Benmelen de 1,724. Este factor convencional surge de asumir que la MO del suelo contiene en promedio un 58% de carbono.
c) Expresar los resultados en 100 g de suelo.

Entonces para 6,4 mg g^{-1} de CO:
a) 1000 mg ----------1 g
6,4 mg -----------x = $\frac{6{,}4\ \cancel{mg}\ x\ g}{1000\ \cancel{mg}}$ = 0,0064 g de Co
b) 0,0064 g de CO x 1,724 = 0,011 g de MO
c) 1g de suelo--------0,011 g de MO
100g de suelo----- x = $\frac{0{,}011\ g\ x\ 100\ g}{1\ g}$ = 1,1% de MO

Respecto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la unidad para expresarlo históricamente ha sido el meq 100 g^{-1}, pero en la actualidad se expresa en centimol carga por kilogramo de suelo seco ($cmol_c\ kg^{-1}$). La equivalencia entre ambas unidades es:

La conductividad eléctrica (CE) se expresa en dS m^{-1}, ya que en el SI la unidad es el Siemens (S). Aún se sigue utilizando las unidades mmhos cm^{-1} y su equivalencia es 1 mmho cm^{-1} = 1dS m^{-1}. Otras equivalencias a tener en cuenta es:

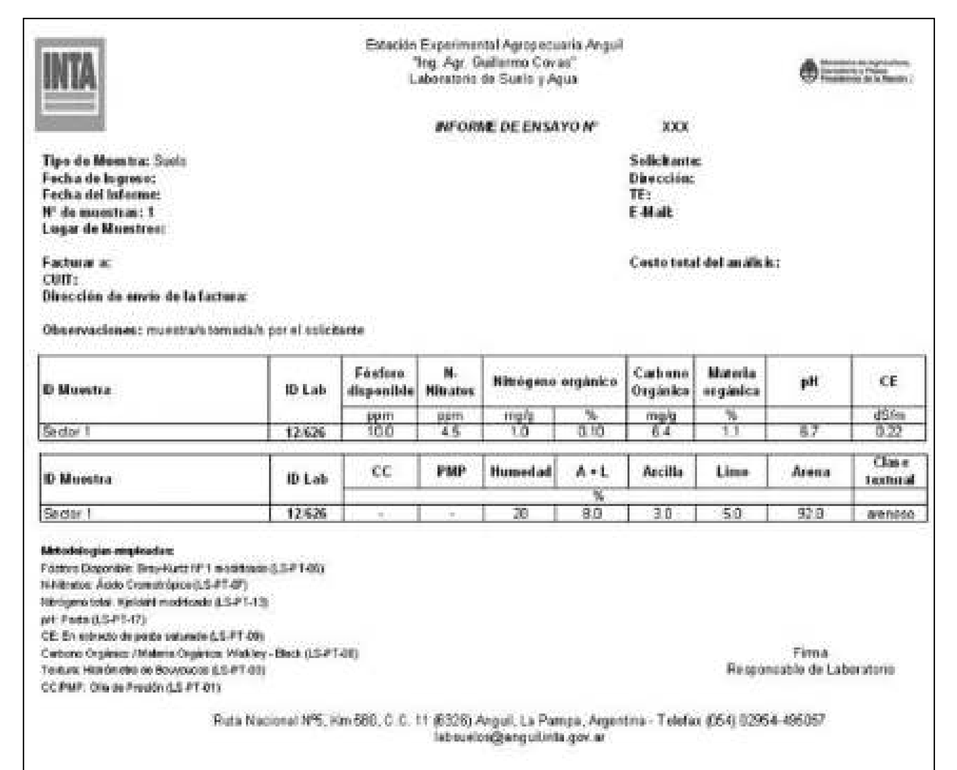
1 S cm^{-1} =10 dS cm^{-1} =1.000 mS cm^{-1} =1.000.000 μS cm^{-1}

La muestra de suelo enviada al Laboratorio presenta una C.E. de 0,22 dS m^{-1}. Expresaremos éste resultado con las unidades más comunes que pueden encontrarse:

0,00022 S cm^{-1} 0,0022 dS cm^{-1} 0,22 mS cm^{-1} 220 μS cm^{-1}

2. Cambio de escala: de unos gramos de suelo a una hectárea

El laboratorio recibe una muestra representativa del lote que desea caracterizar. Al realizar las determinaciones se utilizan pequeñas cantidades de muestra, por ejemplo para MO (micrométodo) se pesan 0,1 g de


INTA

Estación Experimental Agropecuaria Anguil
"Ing. Agr. Guillermo Covas"
Laboratorio de Suelo y Agua

INFORME DE ENSAYO N° XXX

Tipo de Muestra: Suelo
Fecha de Ingreso:
Fecha del Informe:
N° de muestras: 1
Lugar de Muestreo:

Solicitante:
Dirección:
TE:
E-Mail:

Facturar a:
CUIT:
Dirección de envío de la factura:

Costo total del análisis:

Observaciones: muestra/s tomada/s por el solicitante

ID Muestra	ID Lab	Fósforo disponible	N. Nitratos	Nitrógeno orgánico		Carbono Orgánico	Materia orgánica	pH	CE
		ppm	ppm	mg/g	%	mg/g	%		dS/m
Sector 1	12626	10.0	4.5	1.0	0.10	6.4	1.1	6.7	0.22

ID Muestra	ID Lab	CC	PMP	Humedad	A + L	Arcilla	Limo	Arena	Clase textural
					%				
Sector 1	12626	-	-	20	8.0	3.0	5.0	92.0	arenoso

Metodologías empleadas:
Fósforo Disponible: Bray-Kurtz N°1 modificado (LS-PT-05)
N-Nitratos: Ácido Cromotrópico (LS-PT-07)
Nitrógeno total: Kjeldahl modificado (LS-PT-13)
pH: Pasta (LS-PT-17)
CE: En extracto de pasta saturada (LS-PT-09)
Carbono Orgánico / Materia Orgánica: Walkley - Black (LS-PT-08)
Textura: Hidrómetro de Bouyoucos (LS-PT-03)
CC/PMP: Olla de Presión (LS-PT-01)

Firma
Responsable de Laboratorio

Ruta Nacional N°5, Km 580, C.C. 11 (6326) Anguil, La Pampa, Argentina - Telefax (054) 02954-495057
labsuelos@anguil.inta.gov.ar

Figura 1. Resultados enviados por el Laboratorio de Suelos.

suelo. Los resultados se expresan en 100g (%) de suelo o en 1 kg de suelo. En general se desea saber cuanto hay de una propiedad química y/o física en una hectárea de ese suelo. Para realizar los cálculos que nos permitirán hacer el cambio de escala es necesario contar con la siguiente información del suelo con el que estamos trabajando:

- Densidad aparente, depende de la textura. En nuestra región predominan los suelos franco, franco arenoso y arenosos. Si no se conoce el valor de la densidad aparente puede utilizarse los siguientes valores según el tipo de textura (Tabla 4).
- Profundidad de muestreo. En general se utiliza una profundidad de 0-20 cm pero hay excepciones tales como en nitratos.
- Una hectárea = 10000 m^2
- Volumen de una hectárea. Esto dependerá de la profundidad de muestreo (prof). V = 10000 m^2 x prof.

Del informe de resultados enviado por el laboratorio (Figura 1) vamos a extraer los datos para realizar los cálculos. El análisis de textura nos indica que se trata de un suelo arenoso, por lo que utilizaremos como densidad aparente 1200 kg m^{3-1}. La profundidad de muestreo es de 0,20 m y el volumen de una hectárea es de 2000 m^3.

a) ¿Cuanto nitrógeno de nitratos (N-NO3-) tenemos en kg ha^{-1}?

En el informe enviado por el laboratorio el resultado se expresa en ppm de N-NO3-. En caso de que se informe nitratos (NO3-) debería multiplicarse el valor por un factor de 0,2258 para pasar a N-NO3-. Este factor contempla la cantidad de nitrógeno (14 g) que posee la estructura química de los nitratos (64 g). Si el dato que arrojó el análisis del laboratorio es de 20,0 ppm de nitratos, entonces tendremos:

N-NO3- (ppm) = 20,0 x 0,2258 (14g de N/62g de NO3-) = 4,5 ppm de N-NO3-
este es el valor informado por el laboratório.

Como ppm son mg kg^{-1} de suelo, debemos pasarlos a kg de N-NO3-. ¿Cuántos mg hay en un kg? 1000000 mg = 1 kg entonces

1000000 mg N-NO3- ----- 1 kg N-NO3-
4,5 mg N-NO3-------------- x = 0,0000045 kg de N-NO3-

Tabla 4. Valores estimativos de densidad aparente para las tres texturas más frecuentes en suelos de la RSP.

Textura	Densidad aparente
suelos arenosos	1200 kg m^{3-1}
suelos francos	1000 kg m^{3-1}
suelos franco arenoso o arenoso franco	1100 kg m^{3-1}

Para obtener los kg ha^{-1} de N-NO3- hacemos el siguiente análisis:

El volumen que ocupa una hectárea de suelo con una profundidad de 0,2 m es: 10000m2 * 0,2 m = 2000 m^3. Para transformar éste volumen de suelo en kg de suelo utilizamos el dato de densidad aparente:

1 m^3 -------------- 1200 kg de suelo
2000 m^3 --------- x = 2400000 kg de suelo en una ha

Si tenemos 0,00000452 kg de N-NO3- por kg de suelo entonces:

1 kg de suelo ------------- 0,0000045 kg de N-NO3-
2400000 kg de suelo --- x = 10,8 kg de N-NO3- por ha de suelo

Estas conversiones de unidades pueden simplificarse en la siguiente ecuación, que permitirá en un solo paso pasar ppm de NO3- a kg de N-NO3- :

$$= \frac{\text{N-NO3 x 0,2258 x Área x Profundidad x Densidad Aparente}}{1000000} =$$

$$= \frac{20{,}0 \times 0{,}2258 \times 10000 \times 0{,}20 \times 1200}{1000000} = 10{,}8 \text{ kg de N-NO3- ha}^{-1}$$

La Tabla 5 muestra algunos valores de NO3- y N-NO3- en ppm y kg/ha a diferentes profundidades.

b) ¿Cuanto nitrógeno orgánico (No) tenemos en kg ha^{-1}?

Es común escuchar hablar sobre el contenido de nitrógeno total que posee un suelo. El nitrógeno total (N_T) es la suma del contenido de nitrógeno orgánico (N_o) e inorgánico (N_i):

$$N_T = N_o + N_i$$

Profundidad en cm	NO_3^- en ppm	$N\text{-}NO_3^-$ en ppm	$N\text{-}NO_3^-$ en kg ha^{-1}
0-20	45,5	10,3	24,7
20-40	25,4	5,7	13,7
40-60	32,6	7,4	17,6
Suma 0-60			**56,0**
0-20	59,7	13,5	32,3
20-40	62,6	14,1	33,9
40-60	41,9	9,5	22,7
Suma 0-60			**88,9**

Tabla 5. Cálculo de NO3- en ppm a N-NO3- en kg ha^{-1} en capas de 20 cm de profundidad.

La determinación química frecuentemente utilizada para determinar el N es el método de Kjeldhal y lo que éste método mide es N_o y una mínima porción de N_i. Por lo tanto, el dato emitido por un laboratorio en el que el método utilizado ha sido Kjeldhal nos da el valor de N_T, no de N_o. Sin embargo, como en el suelo la mayoría de N es de origen orgánico puede considerarse que: $N_o=N_T$.

En el análisis del laboratorio mencionado anteriormente el dato de No se expresa en % y en mg g^{-1}. Esta es una buena opción para, por un lado cumplir con las exigencias que demandan algunas metodologías normalizadas de expresar los resultados por ejemplo en mg g^{-1}, y la demanda de los usuarios que muchas veces prefieren trabajar en otras unidades. Esto último tal vez se deba a que existe bibliografía de referencia expresada en estas unidades o a cuestiones de acostumbramiento.

Por el volumen de suelo y la densidad aparente sabemos los kg de suelo en una hectárea:

1 m^3 ---------------- 1200 kg de suelo
2000 m^3 ----------- x = 2400000 kg de suelo en una ha

El contenido de No según el resultado del laboratorio es de 0,10 % = 0,10 kg en 100 kg de suelo. En una hectárea tenemos 2400000 kg de suelo, entonces:

100 kg de suelo ---------------- 0,10 kg de No
2400000 kg de suelo--------- x = 2400 kg de No

Los cálculos de pasaje de N % a kg ha^{-1} pueden simplificarse en una sola ecuación:

= N (%) x Área x Profundidad x Densidad Aparente =

= (0,10/100) x 10000 x 0,20 x 1200 = 2400 kg de N_o ha^{-1}

Teniendo en cuenta que en el suelo la mayoría del N se encuentra bajo formas orgánicas, en aquellos casos en que no dispongamos del resultado del análisis de No, podríamos estimar el valor del mismo con el resultado del análisis de MO en %. Aplicando la siguiente ecuación:

$$N_o\ \% = \frac{MO\ \%}{20}$$

c) ¿Cuánta Materia Orgánica total (MO) tenemos en kg ha^{-1}?

El razonamiento es igual que en los casos anteriores. El laboratorio informó la concentración de Co (6,4 mg g^{-1}) y MO (1,1%). Vamos a realizar el cálculo utilizando una única ecuación:

$$MO\ (kg\ ha^{-1}) = \frac{MO\% \times \text{Área} \times \text{Profundidad} \times \text{Densidad Aparente}}{100} =$$

$$MO\ (kg\ ha^{-1}) = \frac{1{,}1 \times 10000 \times 0{,}2 \times 1200}{100} = 26419 \text{ kg de MO } ha^{-1}$$

d) ¿Cuánta Materia Orgánica joven, lábil o fácilmente mineralizable (MO_j) tenemos en kg ha^{-1}?

Para explicar la conversión de unidades para MO_j, es necesario conocer la metodología del fraccionamiento de la misma. Suelen mencionarse en bibliografía dos métodos distintos:

- Fraccionamiento por tamaño de partícula, a partir de lo cual se obtiene la MO_j particulada.
- Fraccionamiento por densidad, a partir de lo cual se obtiene la MO_j liviana.

Si se utiliza un método de fraccionamiento por tamaño de partícula (Figura 2), se obtiene la MO_j particulada que es la fracción que presenta un tamaño entre 53-2000 µm.

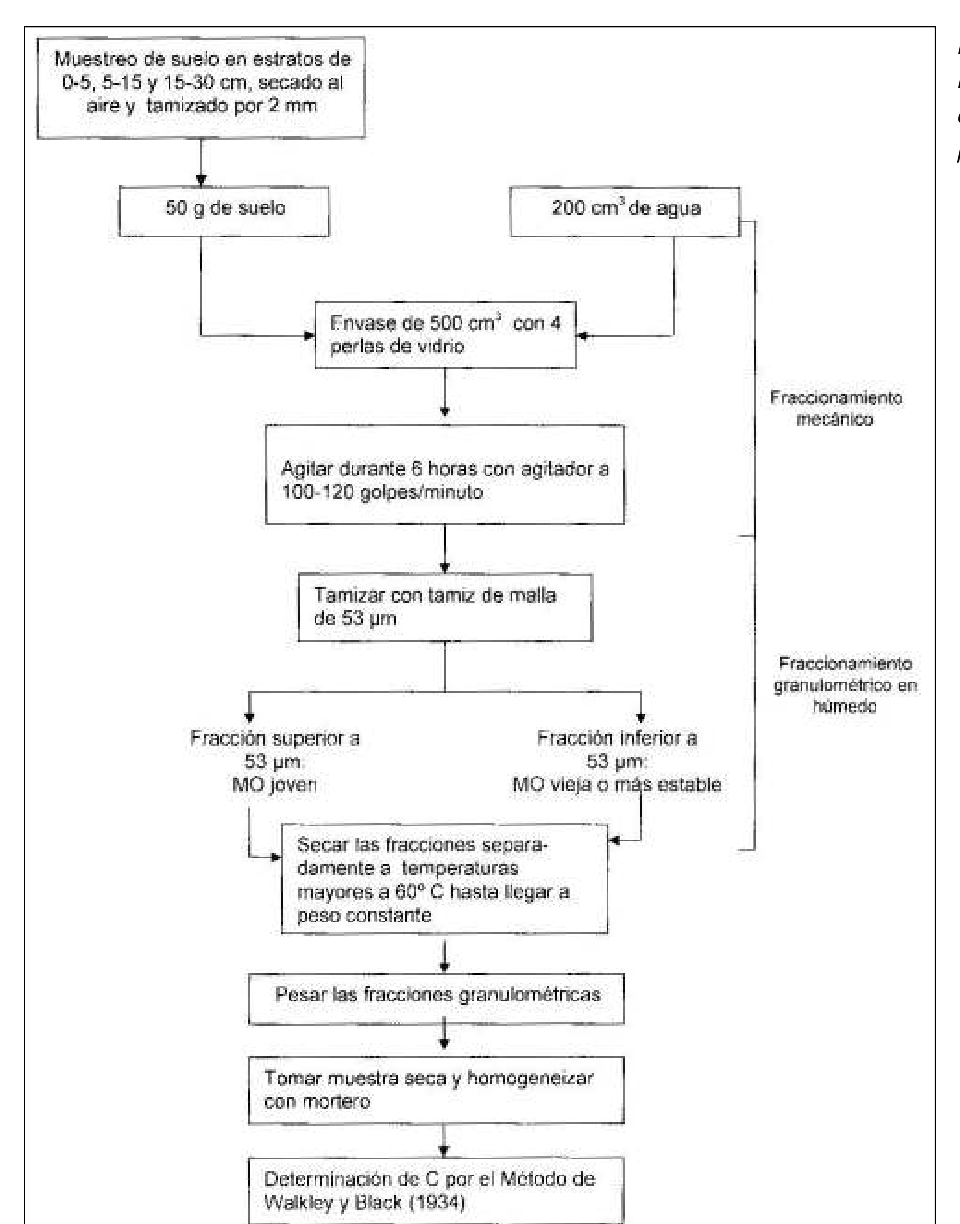


Figura 2. Esquema del método para la determinación de MO_j particulada.

Supongamos que de los 50 g de suelo utilizados en la metodología quedaron de la fracción de 53 a 2000 µm 33,6 g de peso seco de suelo (PS) y que ésta fracción tiene un contenido de MO de 0,28 %. Entonces:

50 g ----- 100 %
33,6 g --- x= 67,2 % de la fracción de 53 a 2000 µm (a)

El volumen que ocupa una hectárea de suelo con una profundidad de 0,2 m es: 100 m * 100 m * 0,2 m = 2000 m^3 de suelo en 1 hectárea. Los kg de suelo que están en ese volumen se pueden calcular utilizando la densidad aparente del suelo.

1 m^3 -------------- 1200 kg de suelo
2000 m^3 ---------- x = 2400000 kg de suelo en una ha

El contenido de MO de la fracción 53-2000 µm según el resultado del laboratorio es de 0,28 % = 0,28 kg de MO en 100 kg de suelo. En una hectárea tenemos 2400000 kg entonces:

Volviendo a (a)
100 % ------------ 2.400.000 kg
67,2 % ----------- x= 1.680.000 kg
Si el contenido de esa fracción de MO es de 0,28%:
100 % ------------ 1.680.000 kg
0,28 % ----------- x= 4515,8 kg ha^{-1}

El cálculo en una sola ecuación es:

$$= \frac{MO \times PS \times Área \times Profundidad \times Densidad\ Aparente}{50} =$$

$$= \frac{0.28 \times 33.6 \times 10000 \times 0.2 \times 1200}{100 \times 50} = 4515.8 \text{ kg MO ha}^{-1}$$

El mismo razonamiento se aplica para la materia orgánica vieja (MO_V) < 53 µm.

e) ¿Cuanto Fósforo asimilable (P) tenemos en kg ha^{-1}?

Si utilizamos una sola ecuación, la cual se obtiene de la misma forma que hemos construidos las anteriores:

$$P\ (\text{kg ha}^{-1}) = \frac{P \times Área \times Profundidad \times Densidad\ Aparente}{1000000}$$

$$P\ (\text{kg ha}^{-1}) = \frac{10 \times 10000 \times 0{,}20 \times 1200}{1000000} = 24 \text{ kg de P ha}^{-1}$$

f) ¿Cuánta Humedad total (H_T) tenemos en mm de agua?

También utilizando una ecuación calcularemos la humedad total de % a mm:

$$H_T\ (\text{mm}) = \frac{Área \times Profundidad \times Densidad\ Aparente \times Humedad}{10000} =$$

$$H_T\ (\text{mm}) = \frac{10000 \times 0{,}2 \times 1200 \times 20}{10000 \times 100} = 48 \text{ mm agua ha}^{-1}$$

g) ¿Cuantos Cationes de intercambio ($cmol_c$ kg^{-1}) tenemos en kg ha^{-1}?

Tal como se indicó en el capítulo anterior, la CIC y cationes intercambiables de un suelo se expresan en términos de centimol carga por kg ($cmol_c$ kg^{-1}) unidad equivalente a meq 100 g^{-1} utilizada históricamente. El equivalente-gramo (PEQ) es igual al peso atómico (PA) del elemento expresado en gramos dividido su número de oxidación; el miliequivalente-gramo resulta de hacer el cálculo: PEQ/1000. Algunos ejemplos utilizados en el cálculo de cationes intercambiables en suelo son:

Para K:

PA: 39; número de oxidación: +1 ⟶ PEQ= 39/1 = 39 g ⟶ 1 meq = 1 $cmol_c$ = 39 mg

Para Ca:

PA: 40; número de oxidación:+2 ⟶ PEQ= 40/2 = 20 g ⟶ 1 meq = 1 $cmol_c$ = 20 mg

El peso equivalente se expresa en gramos, los $cmol_c$ en mg. En síntesis sí un suelo tiene una CIC de 10 cmolc kg^{-1}, un Kg de ese suelo es capaz de adsorber 10 $cmol_c$ de H^+ ó de K^+ ó de Na^+ o 5 $cmol_c$ de Ca^{2+} ó Mg^{2+}. Como se mencionó en el capítulo anterior, la proporción de la CIC ocupada por las bases intercambiables (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+ y K^+) es llamada Porcentaje de Saturación de Bases (PSB) y la misma puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$PSB = \frac{\text{Sumatoria de Bases intercambiables } (cmol_c\ kg^{-1})}{CIC\ (cmol_c\ kg^{-1})}$$

3. Cuadernillo de ejercitación

En esta ejercitación cuando se realizan análisis económicos solo son a los fines prácticos. En el momento real de tomar las decisiones se deben hacer con los precios actuales de mercado.

Ejercicio Nº 1

En la siguiente Tabla 6 se muestran resultados de análisis de suelo de distintos lotes del sur de Córdoba, este de La Pampa y oeste de Buenos Aires. Además se incluye la profundidad del perfil, la napa, los antecesores, los años de agricultura y el sistema de labranza. En base a está información se pueden formular las siguientes preguntas:

1. ¿En que momento y periodicidad se sacarían muestras de suelo para realizar estas determinaciones?
2. ¿Qué dato muy importante nos falta en esta información y que la podemos obtener a campo con métodos muy simples?
3. ¿Con estos datos se podrían elaborar algunos índices que nos permitan interpretar mejor esta información?
4. Si pensamos implantar una pastura ¿cuales son los mejores lotes y cuales tienen los mayores problemas para sembrar la misma?
5. Con esta información si nos situamos en los meses de abril-mayo o agosto-septiembre ¿Qué estrategias podemos seguir para la selección de lotes para cosecha fina y gruesa?
6. En los lotes con niveles bajos de P asimilable (< a 15 ppm) ¿que estrategias seguiría y cuantos kg de P necesitaría aplicar para llevarlo a 15 ppm?
7. ¿Qué cultivos haría de acuerdo a la profundidad del perfil, profundidad de la napa y calidad del agua de la napa?

Tabla 6. Resultados de análisis de suelo de distintos lotes del sur de Córdoba, este de La Pampa y oeste de Buenos Aires.

Localidad	Nº de lote	pH	MO %	NO %	P ppm	Nitratos ppm	CE $dS\ m^{-1}$	CIC	Ca	Mg	K	Na	Textura en %			Profundidad en cm		Antecesor	Años de agricultura	Sistema labranza
								$cmol_c\ kg^{-1} = meq\ 100\ g^{-1}$					Arcilla	Limo	Arena	Perfil	Napa			
Sur de Córdoba y Norte de La Pampa	1	6,1	2,1	0,10	20,4	26,8	0,5	9,5	3,2	1,6	2,8	0,5	6,4	35,6	58,0	120-140	>500	Soja	4	SD
	2	6,0	2,4	0,11	13,4	27,2	0,9	10,1	5,8	2,4	1,7	0,3	8,8	33,6	57,6	90-180	>500	Soja	6	SD
	3	6,1	2,8	0,13	19,4	33,7	1,0	13,2	8,1	1,2	2,7	0,3	10,8	34,6	54,6	>180	220	Verdeo	1	SD
	4	6,1	1,3	0,07	17,1	33,8	0,6	10,1	4,1	2,2	2,5	0,6	10,8	26,3	62,9	140	>500	Maíz	>10	LC
	5	6,3	1,6	0,06	20,2	48,2	0,3	11,8	6,7	2,1	1,8	0,4	11,8	29,3	58,9	>180	300	Maíz	>10	LC
	6	6,0	1,2	0,05	13,2	12,0	2,5	12,4	5,9	3,1	2,5	0,7	10,8	29,3	59,9	100	40	Soja	>10	SD
	7	5,9	2,8	0,13	27,5	32,8	0,9	9,6	3,7	1,6	1,8	0,6	10,6	28,3	61,2	>180	>350	Soja	2	SD
	8	6,0	1,8	0,08	11,9	34,9	0,8	8,5	4,2	1,4	1,1	0,2	7,6	22,3	70,2	>180	>350	Soja	2	SD
	9	6,1	1,3	0,05	19,7	31,2	0,7	9,2	4,8	2,1	1,7	0,5	9,8	27,6	62,5	120	>500	A+V	0	SD
	10	6,2	1,8	0,07	13,2	33,7	0,8	8,5	3,2	1,9	2,2	0,6	9,6	26,3	64,2	>180	300	Trigo	>10	LC
Alvear	1	6,2	2,4	0,12	27,5	79,0							7,0	29,0	64,0	>180	320	Soja	3	SD
	2	6,2	1,2	0,06	26,2	43,1							4,0	16,0	80,0	>180	180	Girasol	8	SD
	3	5,9	1,0	0,05	30,6	50,1							2,0	8,0	90,0	>180	400	Maíz	8	SD
	4	5,9	2,3	0,13	43,1	67,7							4,0	18,0	78,0	>180	220	Maíz	5	SD
	5	6,0	1,6	0,08	37,7	54,9							4,0	19,0	77,0	>180	250	Girasol	5	SD
	6	6,0	0,8	0,04	34,2	41,9							2,0	10,0	88,0	>180	0	Girasol	3	SD
Gral. Pico	1	5,7	1,9	0,10	32,8	60,4		14,2	6,9	3,1	2,5	0,2	10,0	34,0	56,0	>180	300	Trigo	4	SD
	2	6,1	1,2	0,06	13,7	72,1	0,32						4,0	17,0	79,0	>140	>500	Soja	3	SD
E. Castex	1	6,3	2,0	0,12	6,5	42,1							9,0	26,0	65,0	100	>500	Trigo	>10	LC
	2	6,3	1,5	0,07	5,9	19,2							8,0	23,0	69,0	80	>500	Trigo	>10	LC
	3	7,3	1,5	0,08	4,6	21,1							6,0	22,0	72,0	60	>500	Trigo	>10	LC
	4	7,0	2,0	0,13	8,7	69,7							14,0	40,0	46,0	110	>500	Trigo	>10	LC
Winefreda	1	5,9	3,6	0,16	51,6	69,8		24,7	10,5	3,2	3,4	1,2	14,0	46,0	40,0	90	>500	Trigo	4	SD
	2	6,3	1,1	0,15	36,6	25,6		7,1	3,5	1,5	1,2	0,5	2,0	6,0	92,0	>180	220	Trigo	4	SD
Villegas	1	5,2	2,1	0,14	37,9	65,2		14,0	6,8	3,1	2,1	0,5	6,0	39,0	55,0	>180	>500	Trigo	4	SD
	2	5,6	2,3	0,18	11,8	45,6		14,2	7,6	2,8	2,6	0,5	4,0	36,0	60,0	>180	320	Trigo	4	SD
Catriló	1	5,8	2,4	0,14	19,6	95,7							6,0	19,0	75,0	120	>500	Soja	>10	SD
	2	7,1	1,0	0,05	17,1	62,6							5,0	14,0	81,0	>180	220	Girasol	8	SD
	1	6,4	1,5	0,06	17,5	52,5							6,0	17,0	77,0	>180	300	Girasol	11	SD
Macachin	2	7,0	1,4	0,08	18,0	28,7							6,0	15,0	79,0	140	>500	Trigo	5	SD
	3	6,4	1,9	0,10	9,1	26,7							8,0	29,0	63,0	>140	>500	Girasol	8	SD

Las respuestas a estas preguntas se pueden obtener con la lectura de los distintos capítulos desarrollados en este manual.

Ejercicio Nº 2

La siguiente ejercitación tiene cómo fin la interpretación del análisis de suelo dentro de una situación particular para la toma de decisiones en un sistema de producción. En la misma se resumen algunos puntos desarrollados en el manual para la aplicación practica al momento de realizar un determinado diagnósticos no deben ser considerados "recetas" ya que se pueden presentar variaciones importantes dependiendo las aptitudes zonales.

Problema:

Para una siembra de trigo: Analizar la necesidad o no de fertilizar con nitrógeno y fósforo. En el caso de fertilizar, aplico una dosis fija para los tres lotes?

Profundidad de muestreo 0-20 cm	Lote 1	Lote 2	Lote 3
pH	6.1	6.0	6.1
MO %	2.6	1.5	1.1
Nitrógeno total %	0.15	0.08	0.06
Fósforo asimilable ppm	9.0	25.0	15.6
Nitratos ppm	26.8	19.0	44.0
CE dS m^{-1}	0.5	0.9	1.0
Textura Arena %	58	65	80
Textura Limo %	31	28	14
Textura Arcilla %	11	7	6
Profundidad de perfil (cm)	120-140	80	>180
Profundidad de la napa en (cm)	0	0	180
CRA mm (cap de ret. agua al metro)	110	85	65
Agua Util al metro	100	65	35

Lo primero que habría que analizar sería la condición hídrica de los distintos perfiles. Teniendo en cuenta que el contenido de arena es el factor principal que me determina la capacidad de retención de agua (CRA), ya tenemos tres distintas aptitudes de lotes. Tanto el lote 1, cómo el lote 2, los contenidos de agua útil son satisfactorios. El lote 3 estaríamos muy condicionados por las precipitaciones futuras para recargar el perfil. Aunque este lote presenta una muy baja CRA y con solo 30 mm de lluvias estaría el metro de espesor de suelo en capacidad de campo.

Análisis de la Fertilización con Fósforo (P)

El lote 1 presenta un nivel de P asimilable (Pa) para el cultivo y es muy factible que se presenten respuestas en kg de grano por el agregado de P cómo fertilizante. Se decidirá la aplicación de P en ese lote y tratar de elevar el nivel en suelo a nivel de 14 ppm de Pa. Los valores del coeficiente b promedio de 0.52, esta tomado de un promedio de muchos suelos de la región pampeana, Capitulo x, página 162. Teniendo en cuenta que los suelos de la región semiárida pampeana tienen menores contenidos de arcilla, vamos a utilizar un valor de b de 0.65. Cómo se puede observar se necesitaría agregar 19 kg ha^{-1} de P cómo fertilizante.

Coeficiente b	Variacion de Pa en el suelo (ppm) / ppm de P adicionado kg	0.52 / **0.65**	0.27-0.74
Dosis de P para aumentar 1 ppm de Pa	0.1* Dap (tn m-3)*prof (cm) / Coef b	2.5 / 0.65	3.85

Umbrar de Pa para aumentar		
Pa inicial	**9**	ppm
Pa final	**14**	ppm
Diferencia	**5**	ppm

	P%	kg ha^{-1}	
Cantidad de P kg ha^{-1} a aplicar		**19.2**	(3.85*5)
Cantidad de SFT kg ha-1 a aplicar	20	**96.2**	
Cantidad de SFS kg ha-1 a aplicar	9	**213.7**	
Cantidad de FDA kg ha-1 a aplicar	21	**91.6**	
Cantidad de FMA kg ha-1 a aplicar	23	**83.6**	

Cultivo	**Req/tn grano**	
Trigo	**30**	
Rendimiento objetivo	**3500**	
Datos de suelo		
MO%	2.6	
NO%	0.15	
NO kg ha^{-1}	3600	
NO_3 ppm (dato laboratorio)	26.8	
N-NO_3 kg ha^{-1} siembra 0-20	14.5	
N-NO_3 kg ha^{-1} siembra 0-60	34.9	*1
Coef de Mineralización	**0.8**	0.7-1.1
* % del NO		

Nf:(Nc+Nr) - (Ns+Nd+Nm)

		kg N ha^{-1}
	Nc	105.0
	Nr	8.7
	Ns	34.9
	Nd	10.0
	Nm	28.8
Cantidad de N kg ha^{-1} para aplicar	**Nf**	**40**
Cantidad de Urea kg ha^{-1}	**Nf**	**87**

*1(Estimado por el factor de 2.4 por N-No3 0-20)

Nc: N del cultivo (requerido por el cultivo como objetivo de rendimiento).

Nr: N residual 0-60 cm se estima 25% del inicial.

Ns: N siembra 0-60 cm.

Nd: N liberado o inmovilizado por los residuos del cultivo antecesor durante el ciclo del cultivo en interés.

Nm: N mineralizado desde la materia orgánica humificada.

Nf: N del fertilizante.

Análisis de la Fertilización con Nitrógeno (N)
Para decidir la cantidad de N a aplicar vamos a usar cómo método de diagnostico el método del balance de N. El primer paso es plantear un rendimiento de trigo a alcanzar. Este paso es clave, y va a estar definido en función de muchos factores cómo, potencial de la variedad, disponibilidad de agua en el perfil, conocimiento del potencial del lote, etc. Luego se tiene en cuenta que el cultivo requiere 30 kg de N por tonelada de grano.

Ejercicio Nº 3

A) De acuerdo a los siguientes datos de análisis de suelo (Tabla 7) realice una interpretación de cada uno de los lotes. En los mismos no hay tosca o está a más de 200 cm de profundidad y no hay compactaciones subsuperficiales.

1. ¿Cuál sería el rendimiento esperado para trigo y girasol suponiendo que no hay otras limitaciones como niveles de P y humedad de suelo? Usar el modelo del balance de N propuesto, para el N mineralizado usar solo la primera capa y considerar los mismos coeficientes de maíz para girasol.
2. Indicar aquellos lotes donde la probabilidad de respuesta a la fertilización nitrogenada es alta y en cuales es baja.
3. De acuerdo a la relación de precios fertilizante/grano y el nivel de N de nitratos en kg ha^{-1} hasta los 60 cm de los 7 lotes cuales serían las posibilidades de fertilizar trigo con los siguientes precios a) urea a 36.50 dólares los 100 kg y 10,32 dólares el quintal de trigo y b) urea a 35,88 dólares los 100 kg y 20 dólares el quintal de trigo. Suponiendo que no hay otras limitaciones como niveles de P y humedad de suelo.
4. Si el 1 de octubre se sembró girasol. Durante los primeros 90-100 días el cultivo extraerá del suelo 75 % del N requerido para producir 3000 kg/ha de grano. El consumo de agua será de 300 mm y Guillermo Casagrande pronostico lluvias de 200 mm durante los meses de octubre, noviembre y diciembre. En base a los datos de cada lote: a) ¿Cuánto N deberá aportar el suelo durante el ciclo del cultivo para producir 3000 kg ha^{-1} de grano? Y b) ¿cual o cuales lotes tienen más posibilidades de respuesta a la fertilización?

¿Qué otra observación se puede realizar en base a los datos del laboratorio?

B) Para un suelo de textura franca se ha decidido fertilizar con N en la línea de siembra mezclando el fertilizante con la semilla. ¿Cuáles serían las dosis de N máximas según las fuentes a aplicar para los cultivos de trigo, girasol y maíz?

Para resolver este ejercicio ver los Capítulo II, pH, Capítulo IV, agua en el suelo, Capítulos IX, XIII, XIV y XV.

Resolución del ejercicio
A) 1. Para estimar el rendimiento esperado utilizaremos la ecuación del balance de nitrógeno propuesta para esta región. Dado que contamos solo con el dato de MO de los primeros 20 cm de suelo, para la realización de este ejercicio, utilizamos una trans-

Tabla 7. Datos de análisis de suelo.

Establecimiento Doña Eleonora	0-20 cm de profundidad							Agua total en mm hasta 140 cm	
Lotes	NO_3^- en ppm	P asimilable en ppm	MO (%)	Limo+ Arcilla (%)	pH Agua 1:2,5	pH ClK	DA	Total a la siembra	PMP
1. Don Gabriel	80	5	2.0	30	6.39	6.09	1,20	220	90
2. Don Marcelo	20	5	2.0	60	6.40	5.52	1,10	180	150
3. Don Andres	20	30	2.0	30	6.62	5.81	1,20	130	100
4. Don Roberto	60	30	1.5	15	6.66	5.47	1,30	180	70
5. Don Carlos	20	30	2.5	60	6.62	5.60	1,20	210	90
6. Don Dario	20	5	2.0	30	6.64	5.87	1,20	190	80
7. Don Daniel	30	30	1.0	50	6.74	5.81	1,10	190	140

PMP: punto de marchitez permanente. DA: densidad aparente.

formación de MO a N total y los coeficientes de mineralización para la primera capa. Por otro lado, por ser un cultivo de verano usaremos el mismo coeficiente de maíz para girasol.

N fertilizante= (N cultivo + N residual)-(N siembra + N descomposición + N mineralización aparente)

(N cultivo + N residual) = (N siembra + N descomposición + N mineralización aparente)

En primer lugar se transforman los valores de nitratos en ppm a N de nitratos en kg/ha hasta los 60 cm (Tabla 8).

Luego se hacen los cálculos para transformar MO en % a N total, se calculan los coeficientes y se realizan las sumas y restas para obtener la cantidad de N que tendrá el trigo y el girasol y de esta manera poder estimar el rendimiento esperado en cada lote (Tabla 9).

A) 2. La primera variable a tener en cuenta es el agua en el suelo. Los lotes 2, 3 y 7 disponen de poco agua en el perfil (Tabla 7). En relación a los nitratos, Tablas 7 y 8, los lotes 1 y 4 tienen valores altos y el resto (2, 3, 5, 6 y 7) con valores medios a bajos. Luego el índice (MO/(limo + arcilla))* 100, Tabla 11, los lotes 2, 5 y 6 tienen bajos índices. En síntesis el lote 5 es el que tiene mayores probabilidades de respuesta a la fertilización nitrogenada. Posee 120 mm de AU, bajo N de nitratos y bajo índice y además altos niveles de P asimilable. Los demás lotes, tienen poca AU (Tabla 10), altos niveles de N de nitratos o alto índice.

A) 3. De acuerdo a los cálculos de la Tabla 12 con la relación de precios en la situación a) NO SE PUEDE FERTILIZAR NINGUN LOTE, con la relación b) y de acuerdo a los niveles de N de nitratos en kg/ha hasta los 60 cm (Tabla 1): el lote 1 no se puede fertilizar, el lote 2 con una dosis de 103 kg de N ha^{-1}, los lotes 3, 5 y 6 con 93 kg de N ha^{-1}, el lote 4 con 43 kg de N ha^{-1} y el lote 7 con 83 kg de N ha^{-1} aproximadamente.

A) 4. a) El cultivo de girasol necesita 120 kg de N ha^{-1} para producir 3000 kg de grano (Tabla 1, Capítulo XII). De acuerdo a los cálculos de N de nitratos en kg ha^{-1} hasta los 60 cm a la siembra para los 7 lotes (Tabla 8, resolución de ejercicios) se requerirían (Tabla 13).

Lotes	Nitratos ppm	N-NO3 ppm	DA	N-NO3 en kg ha^{-1} Siembra 0-20 cm	N-NO3 en kg ha^{-1} Siembra *2.4 0-60 cm	N-NO3 en kg ha^{-1} Cosecha *25 N residual
1	80	18,07	1,20	43,36	104,08	26,02
2	20	4,52	1,10	9,94	23,85	5,96
3	20	4,52	1,20	10,84	26,02	6,50
4	60	13,55	1,30	35,23	84,56	21,14
5	20	4,52	1,20	10,84	26,02	6,50
6	20	4,52	1,20	10,84	26,02	6,50
7	30	6,78	1,10	14,91	35,78	8,94

Tabla 8. Transformación de nitratos a N de nitratos en kg ha^{-1} hasta los 60 cm.

Tabla 9.

Lotes	MO %	Ntotal % MO/20	Ntotal kg N ha^{-1}	N de descomposición de los residuos kg N ha^{-1}	N mineralizable trigo *0.87	N mineralizable girasol *2.86	N siembra + mineralizable + N descomposición trigo	N siembra + mineralizable + N descomposición girasol	(N siembra + mineralizable + N descomposición) - (N residual) trigo	(N siembra + mineralizable + N descomposición) - (N residual) girasol	Rendimiento Esperado kg ha^{-1} trigo	Rendimiento Esperado kg ha^{-1} girasol
1	2,0	0,10	2400	10	20,88	68,64	134,96	182,72	108,94	156,70	3631	3917
2	2,0	0,10	2200	10	19,44	62,92	52,99	96,77	47,03	90,81	1568	2270
3	2,0	0,10	2400	10	20,88	68,64	56,90	104,66	50,39	98,15	1680	2454
4	1,5	0,08	1950	10	16,87	55,77	111,53	150,33	90,39	129,19	3013	3230
5	3,0	0,15	3600	10	26,10	85,80	62,12	121,82	55,61	115,31	1854	2883
6	2,0	0,10	2400	10	20,88	68,84	56,90	104,66	50,39	98,15	1680	2454
7	1,0	0,05	1100	10	9,57	31,46	55,35	77,24	46,40	68,29	1547	1707

Tabla 10.

Lotes	Agua en mm hasta 140 cm		
	Total a la Siembra	PPM	AU
1	220	90	130
2	180	150	30
3	130	100	30
4	180	70	110
5	210	90	120
6	190	80	110
7	190	140	50

Tabla 11.

Lotes	MO %	L+A %	Indice
1	2,0	30	6,7
2	2,0	60	3,3
3	2,0	30	6,7
4	1,5	15	10,0
5	2,5	60	4,2
6	2,0	30	6,7
7	1,0	50	2,0

A) 4. b) Considerando solamente los niveles de AU a la siembra (Tabla 3) y de acuerdo al pronóstico de Guillermo Casagrande, los lotes 1, 4, 5, y 6 son los que tienen mayores posibilidades de respuesta a la fertilización.

A) 5. pH en agua y en ClK, no hay grandes diferencias, 5.47 sería el valor más bajo. Con lo cual en estas muestras todavía no habría un peligro de acidificación de los suelos.

B) Ver Capítulo XIII, Tablas 4, 5, y 6.

Eficiencia agronómica					
Urea			Urea		
100 kg a 36.50 dólares			100 kg a 35.88 dólares		
46 kg de N	36.50 dólares		46 kg de N	35.88 dólares	
1 kg	0,793 dólares		1 kg	0,78 dólares	
0.793*3,14	2,49 pesos		0.78*3,14	2,44 pesos	
Trigo			Trigo		
100 kg	10,32 dólares		100 kg	20 dólares	
1 kg	0,1032 dólares		1 kg	0,2 dólares	
0.103*3,14	0,32 pesos		0.2*3,14	0,63 pesos	
	2.49/0.3209	**7,78**		2,44/0.63	**3,87**

Tabla 12.

Lotes	Requerimiento para 3000 kg ha^{-1} Girasol	kg N ha^{-1}		kg de N que deben aportar al suelo
		*2.4 0-60 cm	*25 N residual	
1	120	104.08	26.02	41.94
2	120	23.85	5.96	102.11
3	120	26.02	6.50	100.49
4	120	84.56	21.14	56.58
5	120	26.02	6.50	100.49
6	120	26.02	6.50	100.49
7	120	35.78	8.94	93.17

Tabla 13.